

TECNOLOGÍAS DE BANDA ANCHA Y CONVERGENCIA DE REDES



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

SECRETARÍA DE ESTADO
DE TELECOMUNICACIONES
Y PARA LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

Manuel Álvarez-Campana
Julio Berrocal Colmenarejo
Francisco González Vidal
Raquel Pérez Leal
Isabel Román Martínez
Enrique Vázquez Gallo

TeleCable

TECNOLOGÍAS DE BANDA ANCHA Y CONVERGENCIA DE REDES

Manuel Álvarez-Campana
Julio Berrocal Colmenarejo
Francisco González Vidal
Raquel Pérez Leal
Isabel Román Martínez
Enrique Vázquez Gallo



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

SECRETARÍA DE ESTADO
DE TELECOMUNICACIONES
Y PARA LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

TeleCable

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>



**MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO**

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

DIVISIÓN DE INFORMACIÓN,
DOCUMENTACIÓN Y PUBLICACIONES
CENTRO DE PUBLICACIONES

Paseo de la Castellana, 160. 28071 Madrid
Tels.: 91 349 51 29 / 49 68 / 40 00
Fax: 91 349 44 85
www.mityc.es

D.L.:	M-25180-2009
NIPO:	701-09-043-2
I.S.B.N.:	978-84-96275-85-0
Papel:	
Exterior:	Estucado mate ecológico (70.100/250)
Interior:	Offset ecológico (65.90/90) (Certificados EFC y FSC)
Impresión:	Graymo, S.A.
ECPMITYC:	1.ª Ed./1.500/0709
EUAEVF:	18,50 € + IVA

CONTENIDO

Índice de figuras.....	III
Índice de tablas.....	VII
Agradecimientos	IX
1 Introducción	1
2 Tecnologías de acceso	5
2.1 Redes híbridas de fibra y cable (HFC).....	5
2.2 Bucle digital de abonado (xDSL).....	43
2.3 Fibra óptica (FTTx).....	76
2.4 Redes IEEE 802.16/WiMAX	97
2.5 Redes de acceso por satélite.....	120
2.6 Redes locales inalámbricas (WLAN)	150
2.7 Comunicaciones móviles de banda ancha (UMTS/HSPA/LTE).....	182
3 Convergencia de redes.....	211
3.1 El concepto de convergencia	211
3.2 Fases de la convergencia	213
3.3 La convergencia a partir de las redes públicas: fijas o móviles.	218
3.4 La otra aproximación: Convergencia a partir de Internet	230
3.5 Conclusiones	234
4 Entorno de competencia	235
4.1 La competencia en el mercado de banda ancha.....	237
4.2 La competencia en el mercado de acceso móvil	239
4.3 Situación en Europa	241
4.4 Situación en España	243
4.5 Resumen	249
5 Conclusiones	251
Glosario.....	253
Bibliografía	261

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de referencia de una red de CATV coaxial.....	6
Figura 2. Esquema de principio de una red HFC	9
Figura 3. Red HFC bidireccional.....	10
Figura 4. Cabecera de HFC para distribución de TV analógica	11
Figura 5. Cabecera con distribución digital y analógica.....	13
Figura 6. Cabecera HFC para todos los servicios, telefonía TDM.....	15
Figura 7. Cabecera HFC para todos los servicios, telefonía sobre IP	16
Figura 8. Troncal a tres niveles, transmisión hacia el usuario	17
Figura 9. Esquema de la cadena de transmisión hacia el usuario	18
Figura 10. Implementación de canal ascendente en red troncal: aproximación 1	20
Figura 11. Implementación de canal ascendente en red troncal: aproximación 2	20
Figura 12. Red troncal utilizando DWDM.....	21
Figura 13. Esquema simplificado de extensor de línea coaxial	22
Figura 14. Arquitectura abierta de DOCSIS 2.0	25
Figura 15. Escalabilidad de una red HFC	41
Figura 16. Evolución del servicio RDSI acceso básico.....	43
Figura 17. Paradiafonía y Telediafonía	50
Figura 18. Alcances y tasas de transferencia	53
Figura 19. Tasa de transferencia descendente vs. distancia VDSL vs. ADSL.....	53
Figura 20. Perfiles de VDSL2	54
Figura 21. Configuración HDSL en “banco de módems”	55
Figura 22. Configuración HDSL con transmisión SDH integrada	56
Figura 23. Acceso ADSL.....	57
Figura 24. Modelo de referencia de acceso a Internet vía ADSL.....	58
Figura 25. Evolución de Acceso a Internet a <i>Triple Play</i>	58
Figura 26. Red Imagenio	60
Figura 27. Cuotas de mercado de DSLAM	62
Figura 28. Distribución porcentual de conexiones de BA en España 2007	63
Figura 29. Cuota de ingresos xDSL.....	64
Figura 30. Conexión entre central y casa del abonado.....	67

Figura 31. Desagregación de bucle completa	69
Figura 32. Desagregación de bucle por compartición de espectro.....	70
Figura 33. Desagregación de bucle a nivel de caudal digital	70
Figura 34. Modularidades de un DSLAM	72
Figura 35. Consumos típicos de ancho de banda por servicio.....	77
Figura 36. Menor capacidad de sobre-suscripción	77
Figura 37. Arquitectura típica de configuraciones de acceso de Ethernet Activa.....	79
Figura 38. Arquitectura del acceso FiOS de Verizon.....	81
Figura 39. Distribución de servicios en frecuencias y desdoblamiento de lambdas .	82
Figura 40. Espectros CWDM y DWDM	82
Figura 41. Evolución de una arquitectura HFC a una arquitectura RFoG.....	83
Figura 42. Utilización conjunta de la red de distribución óptica.....	84
Figura 43. Red de acceso para FTTx	85
Figura 44. Penetración de tecnologías FTTH en Europa.....	89
Figura 45. Ámbitos de aplicación del estándar IEEE 802.16	98
Figura 46. Familias de estándares IEEE para redes inalámbricas.....	99
Figura 47. Enlaces IEEE 802.16 con o sin visión directa.....	101
Figura 48. Modulación adaptativa en IEEE 802.16	102
Figura 49. Modos de operación IEEE 802.16-2004	104
Figura 50. Estaciones repetidoras IEEE 802.16j.....	105
Figura 51. Proceso de certificación de equipos WiMAX.....	107
Figura 52. Calendario de especificación de perfiles WiMAX Móvil	109
Figura 53. Arquitectura general de una red WiMAX.....	110
Figura 54. Arquitectura de referencia WiMAX NRM <i>Release 1</i>	111
Figura 55. Ejemplo de dispositivos WiMAX certificados	112
Figura 56. Prestaciones de sistemas WiMAX: alcance versus caudal	114
Figura 57. Regulación de la banda 3,5 GHz en España.....	117
Figura 58. Valores de R según UIT-R P.837	119
Figura 59. Ejemplo de cobertura del satélite Hispasat/ Amazonas.....	122
Figura 60. Red VSAT de comunicaciones por satélite.....	122
Figura 61. Constelación de satélites de baja órbita (LEO)	125
Figura 62. Comparación de zonas de cobertura.....	127
Figura 63. Arquitectura genérica de un sistema de comunicaciones por satélite	128
Figura 64. Red satélite híbrida	129

Figura 65. Ejemplo de sistema DVB-RCS.....	130
Figura 66. Ejemplo de sistema DVB-SH.....	131
Figura 67. Distribución de usos del sistema Hispasat en 2007	139
Figura 68. Previsión de las velocidades de transmisión para diferentes medios.....	148
Figura 69. Velocidades máximas de las variantes de IEEE 802.11 hasta 2007	151
Figura 70. Logotipos de la Alianza Wi-Fi y de los productos Wi-Fi certificados.....	151
Figura 71. Acceso Wi-Fi residencial.....	152
Figura 72. Red Wi-Fi con puntos de acceso autónomos	152
Figura 73. Red Wi-Fi con puntos de acceso dependientes de un controlador.....	153
Figura 74. Arquitectura genérica de interconexión de WLAN y red móvil	154
Figura 75. Elementos de IEEE 802.11.....	155
Figura 76. Ejemplo de acceso al medio por contienda (DCF)	156
Figura 77. Estructura de protocolos de HIPERLAN/2.....	158
Figura 78. Colas de espera con diferentes prioridades en una estación 802.11e.....	161
Figura 79. Ejemplo de uso de calidades de servicio diferenciadas con 802.11e	162
Figura 80. Caudal de 802.11n en función de la velocidad de transmisión.....	165
Figura 81. Red Wi-Fi mallada.....	166
Figura 82. Formato de certificado de interoperabilidad Wi-Fi.....	169
Figura 83. Porcentaje de implementación de estándares de capa física	170
Figura 84. Número de equipos que implementan estándares de capa física	170
Figura 85. Equipos con certificaciones de seguridad WPA o WPA2.....	170
Figura 86. Logotipo de los equipos con <i>Wi-Fi Protected Setup</i>	171
Figura 87. Equipos con certificaciones multimedia WMM y WMM <i>Power Save</i>	171
Figura 88. <i>Hotspots</i> T-Mobile en España	172
Figura 89. Mapa de centros eduroam en España.....	173
Figura 90. Uso de tecnologías de acceso inalámbrico en empresas	175
Figura 91. Aplicaciones utilizadas sobre redes Wi-Fi empresariales.....	178
Figura 92. Evolución de sistemas móviles celulares	182
Figura 93. Arquitectura de red UMTS <i>Release 99</i>	184
Figura 94. Ejemplo de topología de red de acceso UMTS.....	185
Figura 95. Organismos de normalización integrados en el 3GPP	187
Figura 96. <i>Releases</i> del 3GPP	189
Figura 97. Multiplexión de usuarios HSDPA por tiempo y códigos	191
Figura 98. Modulación y codificación adaptativa con HSDPA	192

Figura 99. Evolución hacia arquitectura Todo-IP	196
Figura 100. Escenarios de comunicación IMS	197
Figura 101. Interfuncionamiento entre UMTS y WLAN	197
Figura 102. Simplificación de arquitectura de red.....	199
Figura 103. Caudal medio HSDPA según cobertura radio	203
Figura 104. Retardo de ida y vuelta para distintas tecnologías móviles	204
Figura 105. Distribución del espectro en Europa para operación FDD/TDD	206
Figura 106. Estructura celular jerárquica	208
Figura 107. Femtocélulas UMTS/3GPP	209
Figura 108. Niveles de radiación de sistemas de telefonía móvil.....	210
Figura 109. Modelo conceptual de red de telecomunicaciones	212
Figura 110. Principio de acoplamiento débil transporte-control.....	216
Figura 111. Hoja de ruta de un operador establecido hacia la NGN	221
Figura 112. Situación de partida. Red Telefónica Básica	222
Figura 113. Primera fase. Sustitución de centrales Clase 4.....	222
Figura 114. Segunda Fase. Sustitución de centrales Clase 5.....	223
Figura 115. El modelo de negocio del IMS	225
Figura 116. Arquitectura IMS.	226
Figura 117. Arquitectura funcional marco de IPTV	228
Figura 118. Arquitectura funcional de IPTV NGN IMS.....	229
Figura 119. La red del futuro	232
Figura 120. Distribución de tecnologías fijas de banda ancha en el mundo.	238
Figura 121. Competencia en el mercado de banda ancha.....	239
Figura 122. Competencia en el mercado móvil.	240
Figura 123. Desagregación en Europa: líneas DSL mitad 2007	242
Figura 124. Servicios de telecomunicación minoristas (IV Trimestre 2008).....	246
Figura 125. Cuotas de mercado de servicios minoristas sobre ingresos (2008).....	246
Figura 126. Cuotas de mercado de telefonía móvil y banda ancha.....	247

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Versiones de DOCSIS.....	24
Tabla 2. Canales descendentes en DOCSIS y euroDOCSIS.....	27
Tabla 3. Velocidad vs. ancho de banda, canal ascendente	28
Tabla 4. Ventas de los principales fabricantes de dispositivos DOCSIS	34
Tabla 5. Adecuación de las redes HFC a diferentes servicios.....	36
Tabla 6. Características SDSL ETSI	46
Tabla 7. Recomendaciones y capacidades máximas de ADSL	49
Tabla 8. Recomendaciones UIT-T para sistemas DSL	60
Tabla 9. Suministradores de equipos de usuario.....	62
Tabla 10. Clasificación de pares de cobre	71
Tabla 11. Capacidades máximas en mazos de pares.....	71
Tabla 12. Suministradores de DSLAM. Equipo de Central.....	73
Tabla 13. Suministradores de DSLAM. Equipos Remotos	74
Tabla 14. Sistemas PON de banda ancha.....	78
Tabla 15. Características de la capa física Ethernet sobre fibra punto a punto	79
Tabla 16. Suministradores de OLT	89
Tabla 17. Suministradores de ONT con sus características.....	90
Tabla 18. Adecuación de las tecnologías FTTH a los servicios considerados.....	92
Tabla 19. Estándares de redes ópticas pasivas de UIT-T (FSAN) y de IEEE	93
Tabla 20. Características de los estándares IEEE 802.16	99
Tabla 21. Estado de estandarización de IEEE 802.16.....	100
Tabla 22. Clases de servicio en IEEE 802.16.....	103
Tabla 23. Grupos de trabajo del WiMAX Forum.....	107
Tabla 24. Perfiles WiMAX para accesos fijos.....	108
Tabla 25. Perfiles WiMAX Móvil	109
Tabla 26. Tasas de bit de IEEE 802.16 según ancho de canal y modulación	114
Tabla 27. Tipos de órbitas y características principales	123
Tabla 28. Bandas de frecuencia y servicios para satélites de comunicaciones	124
Tabla 29. Selección de estándares ETSI relativos al acceso por satélite.....	133

Tabla 30. Documentos de IETF relativos al uso de TCP sobre enlaces satélite	135
Tabla 31. Recomendaciones de UIT-R sobre transmisión de paquetes y satélite.....	135
Tabla 32. Servicios de Inmarsat	139
Tabla 33. Redes LEO en funcionamiento	140
Tabla 34. Ejemplo de servicios para terminales móviles y portátiles	141
Tabla 35. Ejemplo de servicios HughesNet para terminales fijos.....	142
Tabla 36. Adecuación de los sistemas de comunicaciones por satélite a los servicios de acceso considerados.....	144
Tabla 37. Estándares de la familia IEEE 802.11	154
Tabla 38. Características de transmisión de los estándares 802.11, 11a, 11b y 11g ..	159
Tabla 39. Programas de certificación de la Alianza Wi-Fi.....	168
Tabla 40. Adecuación de las WLAN para diferentes servicios	178
Tabla 41. Series de especificaciones UMTS.....	188
Tabla 42. Categorías de terminales HSDPA	193
Tabla 43. Categorías de terminales HSUPA	194
Tabla 44. Mercado de comunicaciones móviles en España	201
Tabla 45. Caudales máximos de tecnologías móviles	203
Tabla 46: Operadores Móviles Virtuales y Proveedores de Servicios.....	207
Tabla 47. Límites de radiación de sistemas móviles celulares en Europa	210
Tabla 48. Correspondencia entre nodos de diferentes redes y el modelo de red.....	214
Tabla 49. Líneas de banda ancha a final de 2008	245
Tabla 50. Ingresos acumulados por servicios minoristas (millones de €)	245
Tabla 51. Resumen de obligaciones Mercados 4 y 5.....	248

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos agradecer la labor de los respectivos compañeros de Departamento de los autores, que han contribuido generosamente con sus comentarios y críticas constructivas a mejorar los sucesivos borradores del estudio.

Debemos también extender nuestro agradecimiento a los profesionales e instituciones consultados sobre aspectos concretos del trabajo; aunque hemos procurado citar todas las referencias, es posible que exista alguna omisión, por lo que aprovechamos para pedir disculpas.

A Telecable de Asturias, por la confianza depositada en los autores para elaborar una versión preliminar del estudio. Sus comentarios críticos, emitidos desde el respeto a la independencia de opinión, han sido de gran utilidad para enriquecer el documento en su conjunto.

Finalmente, al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, por el apoyo recibido para la publicación del libro.

1 INTRODUCCIÓN

Las redes de acceso constituyen un elemento clave de la cadena de valor de la industria de telecomunicaciones, tanto por su influencia sobre la oferta y calidad de los servicios, como por la importancia que adquieren en los mercados liberalizados. En particular, las redes de acceso de banda ancha juegan un papel destacado en el desarrollo de nuevos servicios en Internet, que están ofreciendo nuevas formas de entrega y uso de los contenidos. Así, la Web 2.0, las redes sociales y el aumento la interactividad otorgan un papel protagonista y central al usuario, convirtiéndose en elementos clave de la innovación en servicios.

Durante los últimos años se han producido avances significativos en la oferta de servicios de acceso a Internet, con un crecimiento sostenido de los accesos mediante ADSL y redes de cable. Igualmente, las redes móviles han aumentado considerablemente su capacidad, permitiendo el acceso a Internet de banda ancha. En 2007 la facturación mundial en servicios de telecomunicaciones aumentó alrededor del 6,2%, debido fundamentalmente al mayor volumen de negocio de la telefonía móvil y al aumento de la demanda de conexiones de banda ancha. A finales de 2008 se estimaba en más de 400 millones el número de abonados de banda ancha en el mundo, con un aumento interanual cercano al 20%.

En general, las tecnologías de acceso de banda ancha han experimentado un aumento importante de prestaciones en los últimos años, consiguiendo que se puedan ofrecer todo tipo de servicios, incluso los más exigentes, como son la distribución de televisión, la descarga de contenidos o los juegos de alta interactividad. Los capítulos siguientes analizan con detalle las principales tecnologías de acceso, considerando tanto sus características técnicas de prestaciones y escalabilidad, como su adecuación a los servicios de telecomunicación.

Junto con las tecnologías de acceso, se estudian las aproximaciones actuales hacia la convergencia de redes, en un contexto en el que los operadores buscan ofrecer paquetes de servicios cada vez más completos, por ejemplo telefonía, televisión e Internet (*triple play*), con el objetivo de mejorar su posición competitiva y captar nuevos clientes.

En el capítulo 2 se estudian las siguientes tecnologías de acceso de banda ancha, agrupadas en función del soporte físico que emplean:

- Tecnologías sobre cable:
 - Redes híbridas de fibra y cable (HFC)
 - Bucle digital de abonado (xDSL)
 - Fibra óptica (FTTx)

- Tecnologías inalámbricas:
 - Redes WiMAX
 - Acceso por satélite
 - Redes locales inalámbricas
 - Acceso móvil de banda ancha

El análisis de cada una de ellas adopta una estructura común con los siguientes apartados:

- a) Motivación original y evolución
- b) Estructura y elementos de red
- c) Normalización
- d) Madurez de la tecnología y del mercado
- e) Prestaciones
- f) Adecuación a los servicios considerados
- g) Aspectos regulatorios
- h) Escalabilidad
- i) Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

En primer lugar se resume la evolución que ha seguido la tecnología desde su aparición, identificando el problema que trató de resolver inicialmente y cómo ha ido evolucionando para adecuarse a los nuevos servicios que han ido surgiendo. A continuación se presentan la arquitectura de la red y los organismos relevantes en su normalización. En los apartados restantes se ha realizado una valoración objetiva de la tecnología de acceso, atendiendo tanto a sus características intrínsecamente técnicas, como a otros elementos no menos importantes, como la aceptación que ha tenido por parte del mercado de telecomunicaciones.

El apartado d) trata de evaluar la madurez de los productos y servicios asociados a la tecnología de acceso, considerando, entre otros indicadores, cifras de negocio a escala mundial y, cuando se ha considerado relevante, en el ámbito europeo y español. En este apartado se incluyen datos sobre el coste de los equipos, especialmente de aquellos que tienen más impacto sobre el coste total de las redes. También se ha aportado información sobre los servicios que se prestan en distintos países, procurando determinar el grado de competencia en que se encuentra el mercado asociado a la tecnología de acceso.

El apartado e) tiene como objetivo cuantificar las prestaciones técnicas de la tecnología de acceso, en función de parámetros clásicos, como cobertura, capacidad efectiva ofrecida a los abonados y retardo de tránsito. Se ha hecho un esfuerzo especial por establecer las relaciones existentes entre los diversos parámetros que inciden en la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios de la red.

El apartado f) está dedicado a valorar la adecuación de la tecnología de acceso para ofrecer servicios de telecomunicación, organizados en tres grupos:

- Telefonía

En este grupo se engloban los servicios de telefonía fija y móvil, estableciendo como referencia de calidad la del servicio ofrecido por la red telefónica convencional.

- Acceso a Internet.

Se proporcionan estimaciones sobre el ancho de banda que es posible ofrecer a los usuarios que acceden a Internet a través de la tecnología considerada. Además, se tienen en cuenta los servicios con una demanda creciente y significativa, que imponen requisitos específicos a la red. En concreto, los servicios de *streaming* de video, las aplicaciones de descarga entre pares (*peer-to-peer*, p2p) y los juegos en red. Los dos primeros se caracterizan por su alta demanda de capacidad, mientras que los juegos de alta interactividad requieren un retardo de tránsito bajo.

- Servicios Audiovisuales

Dentro de este grupo se encuentran la difusión de TV y el vídeo bajo demanda. Con respecto al primero, se evalúa el número de canales simultáneos de TV que la tecnología es capaz de transportar hasta el abonado. Para el segundo, se valora la capacidad de la red para satisfacer sus necesidades de ancho de banda, interactividad y calidad.

Se ha reservado el apartado g) para describir la situación regulatoria en España, con algunas alusiones a otros ámbitos cuando se ha considerado preciso.

En el apartado h) se realiza un estudio sobre la escalabilidad de la tecnología de acceso, es decir, su capacidad para aumentar los niveles de servicio de manera eficiente en coste. Por nivel de servicio se entiende tanto el aumento de la densidad de usuarios en una zona, como el incremento de calidad de servicio demandado por los usuarios (más canales simultáneos de TV, más capacidad en el acceso a Internet). En el análisis efectuado se han tratado de identificar los elementos técnicos y regulatorios, por ejemplo gestión del espectro, que limitan el crecimiento de la tecnología.

Por último, el apartado i) ofrece consideraciones relativas al efecto de las condiciones meteorológicas, geográficas y medioambientales sobre la tecnología de acceso.

El capítulo 3 se centra en la convergencia de redes, cuyo objetivo consiste en que con una única red se puedan ofertar todos los servicios de telecomunicación y de valor añadido que demanden los usuarios. Se trata de un objetivo que ha sido tradicionalmente perseguido por los operadores, principalmente los dominantes, que en el transcurso del tiempo han llegado a situaciones de múltiples redes operadas de forma totalmente aislada, apenas interconectadas y respondiendo cada una de ellas a un tipo de servicio. Pero han sido las comunicaciones móviles e Internet, los elementos que han propiciado un verdadero impulso a la convergencia de redes.

Basándose, entre otros, en estándares de comunicaciones móviles, se describirán las aproximaciones que suponen una evolución a corto y medio plazo de las redes públicas hacia el objetivo de “Red Única”. Siguiendo un enfoque totalmente diferente, se presentarán varios proyectos que tienen como objetivo, a largo plazo, una evolución profunda o un cambio radical de la arquitectura de Internet, y que tendría como resultado final la creación de una nueva red, heredera de la actual y no derivada de las redes públicas, capaz de proporcionar todos los servicios con los mayores niveles de seguridad y calidad, y soportando cualquier modelo de negocio.

El capítulo 4 está dedicado al análisis del grado de competencia de los mercados de telecomunicaciones y la situación e influencia de los procesos regulatorios en curso, prestando especial atención a los segmentos de mercado de acceso de banda ancha y de acceso móvil, por ser los dos motores del crecimiento del sector de las telecomunicaciones en la actualidad. Por último, en el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones del estudio.

2 TECNOLOGÍAS DE ACCESO

2.1 Redes híbridas de fibra y cable (HFC)

2.1.1 Motivación original y evolución

Las redes HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*) son una evolución de las redes de distribución de televisión por cable coaxial. Se pueden considerar varios pasos en esta evolución:

- Su origen se atribuye a Ed Parson de Astoria, Oregón, quien en 1950 distribuyó la señal que recibía por medio de ondas terrestres convencionales mediante un cable paralelo tendido de tejado a tejado, ubicando la antena en un sitio adecuado y amplificando la señal, para paliar los problemas de pobre recepción que sufría la comunidad¹. En el mismo año, Robert Tarlton construyó el primer sistema con cable coaxial que tendió utilizando los postes del tendido eléctrico, previa adquisición de la correspondiente licencia municipal. Estas primeras aplicaciones se limitaron a resolver los problemas de deficiente recepción de las señales radioeléctricas. Un caso interesante fue la ciudad de Nueva York, donde la recepción estaba fuertemente afectada por las reflexiones producidas en los rascacielos. De estas primeras aplicaciones provienen las siglas CATV (*Community Antenna Television*) [1].
- La industria de la distribución de televisión por cable experimentó un fuerte impulso a mediados de los 70, cuando el transporte de señal por satélite añadió canales a los ya disponibles por ondas terrestres. Aunque la tecnología de recepción vía satélite en aquella época era muy cara, sus costes eran abordables al ser repartidos entre los abonados del sistema de cable. Mediante este método, la oferta de contenidos se enriqueció con canales de ámbito nacional e internacional, canales temáticos (noticias, deportes documentales) y canales de películas. Además se añadió la prestación de acceso condicional (canales sólo accesibles a determinados usuarios) que permitió nuevos modelos de negocio, con canales de suscripción (*Pay TV*) o de pago por visión (*Pay per view*, PPV), requiriendo estos últimos algún tipo de señalización hacia el proveedor, que se hacía por la red telefónica.
- Al ir aumentando la oferta de canales fue necesario aumentar el ancho de banda disponible en los sistemas de cable. Como se verá a continuación, los sistemas de cable coaxial tienen unas limitaciones intrínsecas en cuanto al

¹ Cabe señalar que Ed Parson tenía una tienda dónde vendía televisores, y fue su método para facilitar la venta de los mismos. Este es un esquema de negocio que se repite en los orígenes de la televisión por cable.

- A mediados de los 90, da comienzo una nueva etapa en la evolución de las redes de cable, por la introducción de la televisión digital. Con ello se consigue multiplicar el número de canales que pueden transportarse en el ancho de banda del sistema, así como proporcionar mayor calidad de imagen y sonido y nuevas facilidades de interactividad.
- Actualmente los operadores de cable ofrecen a sus clientes, residenciales o profesionales, una amplia gama de servicios de voz, datos y soluciones corporativas, de modo que el servicio de TV, origen de estas redes, se convierte en uno más de los ofrecidos sobre las mismas.

En la Figura 1 se representa una red de distribución de televisión por cable coaxial convencional.

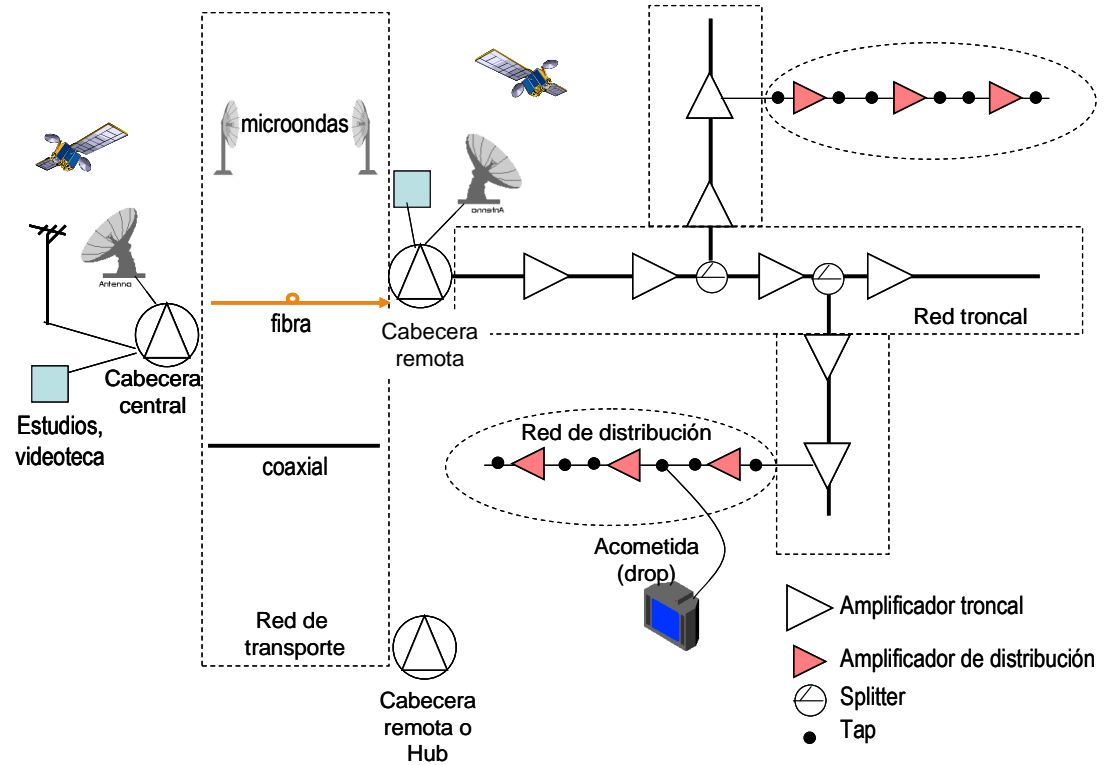


Figura 1. Diagrama de referencia de una red de CATV coaxial

Dentro de las características ideales que ha de tener un sistema de cable coaxial, cabe destacar las siguientes:

- Que disponga de una zona del espectro radioeléctrico dedicada, no compartida con otros servicios, y libre de interferencias.
- Que permita el empleo de los aparatos de televisión convencionales utilizados para la recepción de los canales emitidos por radiodifusión y según la normativa existente. Esto requiere que los canales lleguen a las acometidas de los abonados con la modulación AM-VSB (modulación en amplitud, banda lateral vestigial) habitual y, en principio, dentro de las frecuencias asignadas a los canales de televisión. En este sentido, cabe señalar que el cable coaxial tiene una función de transferencia que presenta atenuación creciente con la frecuencia. Si consideramos el empleo exclusivo de cable coaxial, los límites prácticos de utilización alcanzan un ancho de banda de 1 GHz.

Las limitaciones de la planta coaxial vienen de las imperfecciones de sus componentes, dando origen a dos tipos de perturbaciones: coherentes y no coherentes. Las fuentes de perturbación coherente son diversas: señales exteriores que consiguen introducirse en el cable a través de imperfecciones en blindajes, conectores, etc.; reflexiones de línea por desadaptaciones de impedancia en el cable coaxial; y, quizás las más importantes, las intermodulaciones y modulaciones cruzadas que se producen debido a las no linealidades de los amplificadores-repetidores de los sistemas coaxiales. Este tipo de interferencias resulta ser el más molesto para el usuario de televisión por su repercusión en la calidad de la imagen. En cuanto a las fuentes de perturbación no coherente, la principal es el ruido térmico presente en cualquier sistema de comunicaciones.

Estas limitaciones son aditivas (el ruido en potencia y las intermodulaciones en voltaje) y determinan las prestaciones máximas del sistema: el número de repetidores entre la cabecera y el usuario (relacionado con la distancia en kilómetros) y el ancho de banda que se puede alcanzar (a más repetidores, más interferencia, menos canales utilizables y menos ancho de banda).

Al observar la Figura 1 se pueden distinguir las siguientes partes en una red de cable: la red de transporte, la red de troncal (*trunk network*), la red de distribución (*feeder network*) y la acometida (*drop*). De todas ellas, solamente las tres últimas forman parte de la red de acceso de un sistema de cable, motivo por el cual se tratarán con detalle en los apartados posteriores.

En cuanto a la red de transporte, si bien no forma parte de la red de acceso, cabe hacer algunas consideraciones. En principio, se trata de distribuir la programación de televisión a grandes distancias (decenas o cientos de kilómetros) manteniendo una buena calidad de la señal. El problema reside en que la modulación AM-VSB que espera el usuario final requiere unos niveles de relación señal ruido difíciles de mantener en el sistema de transporte. Por este motivo, en los sistemas convencionales es frecuente la modulación en frecuencia (FM) y más recientemente la transmisión de vídeo en formato digital. Así, en la red de transporte se utilizan modulaciones más robustas (ocupando en el caso de las analógicas mayor ancho de

banda), y en las cabeceras de acceso se realiza la demodulación y posterior modulación en el formato esperado por el usuario final (AM-VSB).

La red troncal en los sistemas convencionales puede suponer un 12% de la longitud total de cable desplegado. En los primeros sistemas, exclusivamente coaxiales, se utilizaban los coaxiales de mayor diámetro (y por tanto de menor atenuación), con amplificadores cada 600-700m que, debido a que sólo tienen que compensar las pérdidas del cable, no tienen que ser de gran ganancia, con lo cual se obtienen mejores linealidades (menor distorsión).

La red de distribución, en cambio, tiene que proporcionar la energía que se deriva hacia cada usuario, a la vez que compensar las pérdidas de cable. Por ello, las distancias máximas suelen ser inferiores a los dos kilómetros. Este segmento de la red constituye alrededor de un 38% de la longitud total de cable desplegado, con lo que se utiliza cable de menor diámetro (más barato) que en la parte troncal. Los amplificadores son de gran ganancia, a fin de compensar la energía derivada hacia los usuarios, siendo los que introducen mayor distorsión.

Finalmente, está la acometida hasta la casa del usuario, que se hace mediante derivaciones o *taps* (generalmente múltiples) desde el cable de distribución, con un cable coaxial flexible (típicamente unos 40 m). La longitud de cable de esta porción viene a constituir la mitad de la longitud total de la planta de cable. Los defectos en el cableado y conectores de esta parte de la red constituyen el principal foco de captación de perturbaciones en la red de cable. La calidad final percibida por el usuario depende en gran medida de la calidad de esta acometida, así como de la de los dispositivos receptores utilizados. Con referencia a estos últimos, cabe señalar que uno de los problemas más habituales es el blindaje inadecuado de los sintonizadores de los TV o de los VCR (*Video Cassette Recorder*). Este hecho puede dar lugar a la captación de emisiones del espacio libre que coincidan en frecuencia con las utilizadas en el cable (*Direct Pick-Up*, DPU). Un efecto curioso es el “fantasma adelantado” cuando coinciden las frecuencias de la misma emisión por cable y por espacio libre, de manera que esta última llega antes que la primera (la velocidad de propagación por cable es menor que por espacio libre). Como consecuencia, se produce una imagen fantasma que precede a la recepción normal, efecto contrario a los “fantasmas” normales producidos por propagación multitrayecto.

Las redes HFC, introduciendo transmisión por fibra óptica en la red troncal, rebajan las perturbaciones, principalmente las coherentes, introducidas por las cadenas de amplificadores-repetidores. El empleo de fibra en la distribución de señales de TV ha sido posible gracias al desarrollo de láseres con características de linealidad suficientes para producir distorsiones mínimas en las señales AM-VSB a transportar. En la Figura 2 se muestra un diagrama de referencia de una red HFC.

La simplicidad de la Figura 2 puede inducir a pensar que la introducción de la fibra es una simple sustitución de la red troncal. En realidad, supone mucho más que eso, ya que la atenuación de la fibra es mucho menor, lo que permite que las distancias a cubrir, sin amplificadores, aumenten considerablemente, pudiendo alcanzar del orden de 100 km. Esto permite diseños de red con mayor cobertura desde la

cabecera, reduciéndose el tamaño de las áreas de distribución, con la consiguiente disminución del número de amplificadores y de las perturbaciones que estos introducen. Gracias a ello, se favorece el aprovechamiento del ancho de banda hasta explotar los límites del coaxial (1 GHz).

El grado de implantación de fibra en la red puede variar. La Figura 2 representa la configuración más implantada, la sustitución de la red troncal. Es este tipo de configuración, denominada *Fiber to the Bridger*, el nodo óptico terminal (NOT), donde se realiza la conversión óptico/eléctrica, se encuentra a la altura del amplificador troncal, del que parten los ramales de distribución. El número de hogares pasados a los que da servicio un NOT en esta configuración puede variar pero usualmente oscila entre 125 y 500. El paso siguiente es la sustitución de todos los amplificadores de distribución por NOTs, dando lugar a la configuración denominada *Fiber to the Last Amplifier* o *Fiber to the Line Extender*. La fibra puede extenderse aún más, llegando hasta la derivación (*tap*) con un NOT que sirva a un número muy limitado de abonados (típicamente 8), configuración conocida como *Fiber to the Curb*, *Fiber to the Building*². Por último, cabría la posibilidad de llevar la fibra hasta el abonado, *Fiber to the Home*, si bien en este caso ya no se trataría de un sistema híbrido [2].

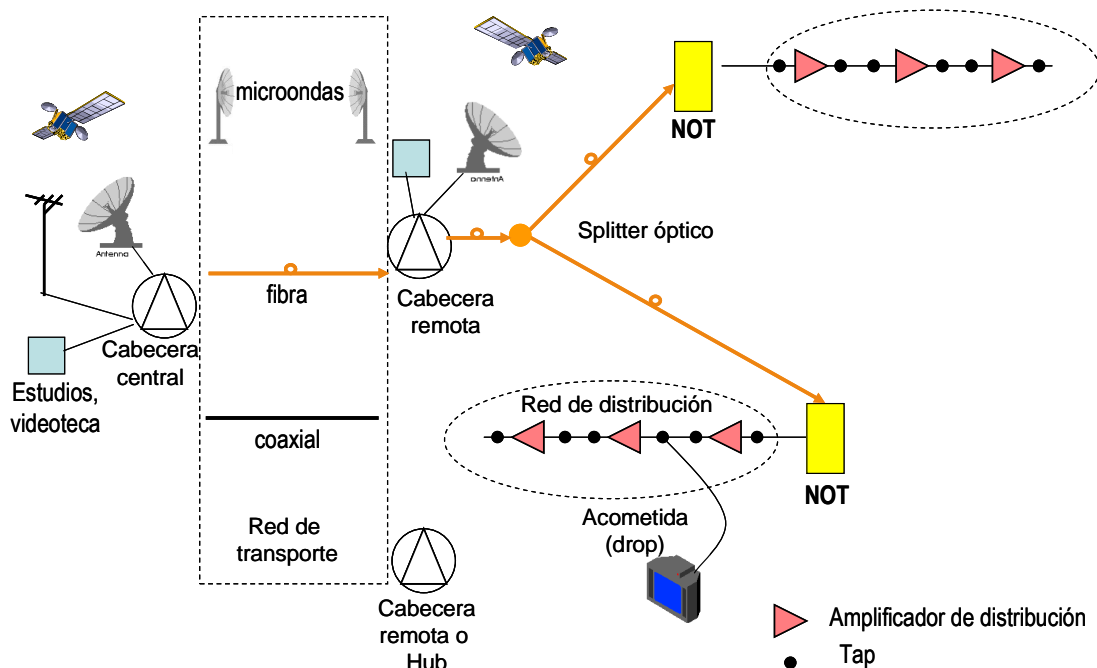


Figura 2. Esquema de principio de una red HFC

² Obsérvese que incluso en este caso conservaríamos el 50% de la planta coaxial, medida en longitud de cable, que es el correspondiente a las acometidas.

Además de poner en disposición un mayor ancho de banda para la distribución de TV, las redes HFC han hecho posible la transmisión de información desde el usuario hacia la cabecera. Esto se consigue por división en frecuencia, convirtiendo los amplificadores del coaxial en bidireccionales, dedicando la parte baja del espectro (de 5 a 50 MHz aproximadamente) a la transmisión en sentido ascendente (de usuario a cabecera). En una red puramente coaxial (ver Figura 1) las perturbaciones en este canal de retorno serían la suma de las provenientes de todos los abonados del sistema, haciéndolo inservible, salvo en el caso de redes muy reducidas. Sin embargo, en las redes HFC los dominios de interferencia quedan reducidos a los tramos donde persiste el empleo de coaxial, de manera que sólo comparten ancho de banda usuarios servidos desde el mismo NOT. El hecho de convertir la red HFC en un medio bidireccional, teniendo en cuenta los anchos de banda disponibles en ambos sentidos, y el número de usuarios en un tramo de coaxial, permite desplegar redes de telecomunicación multiservicio (telefonía, datos, TV) efectivas. En la Figura 3 se muestra el esquema de una red HFC bidireccional.

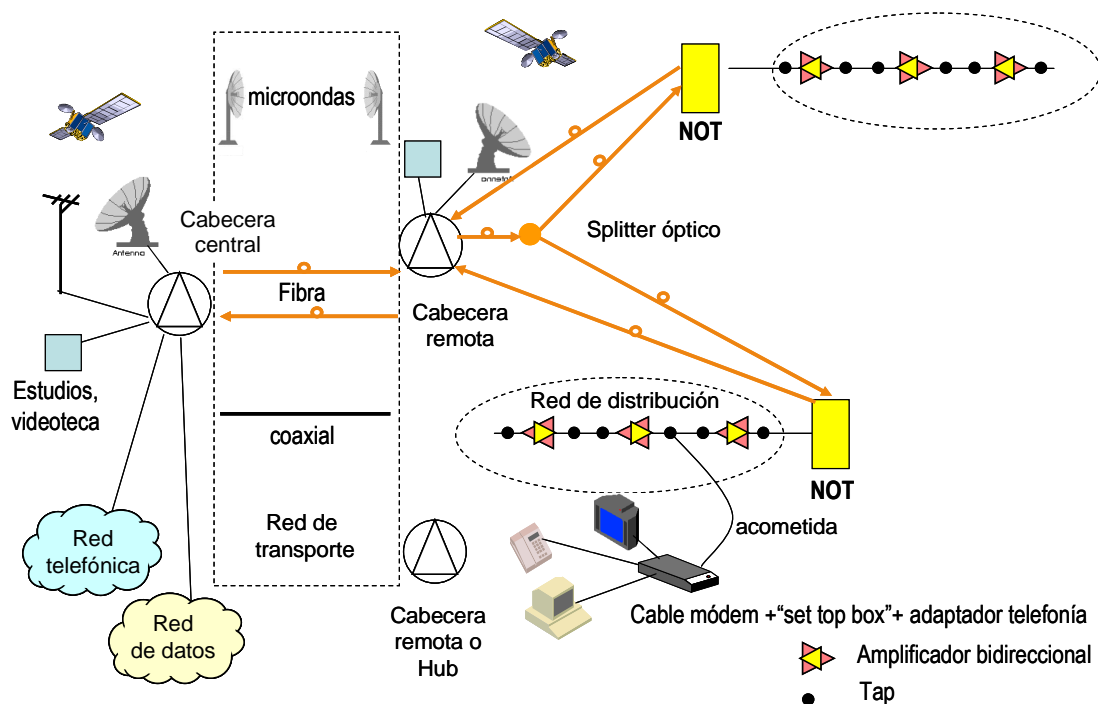


Figura 3. Red HFC bidireccional

2.1.2 Estructura y elementos de red

En este apartado se describen brevemente los principales elementos que componen una red HFC.

2.1.2.1 Cabecera

En la Figura 4 se muestra la estructura de una cabecera de HFC para distribución de TV analógica. Su principal función es combinar las distintas fuentes de programación, ubicándolas en los canales del espectro del cable, con la modulación de los receptores analógicos convencionales.

A la izquierda de la figura se muestran las posibles fuentes de programación:

- Recepción de canales analógicos por satélite, cada uno de ellos ocupando el ancho de banda de un transpondedor de satélite (27 MHz). La captación de estas señales, moduladas en FM para mantener la calidad, se realiza con antenas parabólicas orientadas hacia el correspondiente satélite. Cada antena dispone en su foco de un amplificador de bajo ruido (*Low Noise Block*, LNB) que, además, traslada la señal del satélite a una banda de frecuencias más baja. Debido a las polarizaciones ortogonales usadas en la transmisión vía satélite, es posible que una misma antena alimente a dos LNB con distinta polarización. También es posible utilizar una antena motorizada como sistema redundante, que puede sustituir a cualquiera de las fijas en caso de fallo de algún elemento (no representada en la figura). La salida de los LNB se lleva a los receptores de satélite analógico, que producen a la salida señales de vídeo y audio en banda base.

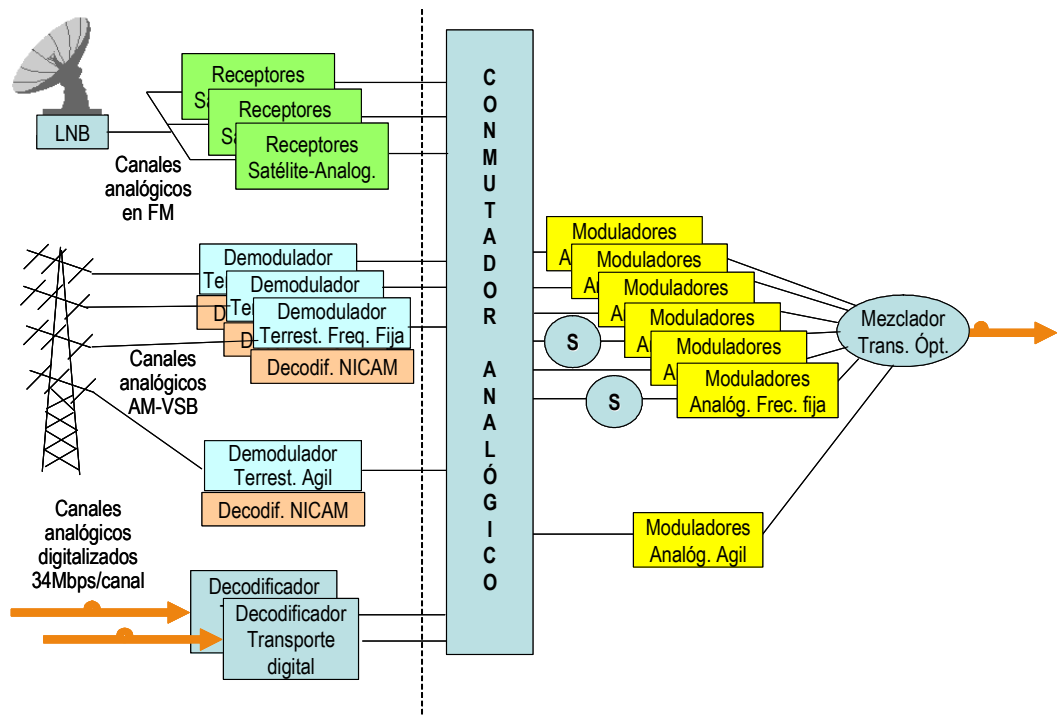


Figura 4. Cabecera de HFC para distribución de TV analógica

- Otra fuente de programación son las emisiones terrestres analógicas. Con el fin de garantizar la calidad (realmente, conseguir que sea mejor que la que podría conseguir el usuario por captación directa), se utilizan antenas

altamente direccionales y sintonizadas a cada canal, ubicadas en sitios desde donde se consiga visión directa con los emisores. Como sistema redundante se utiliza una antena de banda ancha y un receptor sintonizable, capaz de servir a cualquiera de los canales recibidos. En el caso de emisiones con audio NICAM, se requiere el correspondiente decodificador.

- La cabecera puede recibir programas provenientes de otras fuentes. Así, por ejemplo, en la Figura 4 se muestra la recepción de programas transportados mediante SDH en contenedores de 34 Mbit/s. En este caso, se requieren los correspondientes decodificadores para la extracción de la señal en banda base.
- Otras posibilidades de contribución de programas, no representadas, son: recepción desde estudio (en banda base, o con interfaz digital sin comprimir SDI); emisiones de satélite digitales (de 8 a 15 canales por transpondedor); emisiones digitales terrestres; o canales modulados en FM por microondas, sistemas de fibra o coaxiales. En cualquier caso, se requiere el correspondiente demodulador/decodificador para la obtención de las señales de audio y vídeo en banda base.

Las señales de banda base se entregan a moduladores AM-VSB de frecuencia fija, uno por canal del coaxial, los cuales modulan y sitúan cada programa en su canal correspondiente. Por razones de redundancia y flexibilidad de configuración, se equipa una matriz analógica, de forma que se pueda asignar cualquier banda base a cualquier modulador y que, en caso de avería del modulador de frecuencia fija, se pueda conectar la señal de banda base a un modulador de frecuencia variable, sintonizado a la frecuencia de la unidad averiada. En caso de requerir acceso condicional a determinados canales, el operador de cable puede recurrir al empleo de cifradores de la señal en banda base (círculos etiquetados con una S en la figura). Otra posibilidad, menos frecuente, es utilizar sistemas de acceso condicional en radio frecuencia.

A la salida de cada modulador AM-VSB se obtiene un canal con 8 MHz de ancho de banda (sistema europeo PAL) ubicado en alguno de los aproximadamente 60 canales disponibles en la banda entre 50 y 550 MHz.

Para añadir distribución de televisión digital, el método más directo y económico es pasar casi transparentemente las emisiones digitales difundidas vía satélite o terrestre. Cada transpondedor de satélite digital puede multiplexar un cierto número de programas (típicamente, 8), en formato MPEG múltiple de transporte (MPEG-MPTS), con modulación QPSK. La salida del LNB se conecta a unos módulos IRT (*Integrated Receiver Transcoder*) que efectúan el cambio del formato de modulación QPSK del satélite al del cable (típicamente, 64-QAM). El IRT se encarga también de ubicar el programa MPTS dentro de la banda del espectro correspondiente al cable (un canal de 8 MHz en la parte alta de 550 a 850 MHz), extrayendo y actualizando las tablas de sistema. El coste de proveer 48 programas digitales (6 IRTs), recibidos en la misma antena parabólica (con un coste estimado de la antena de unos 10.000 euros), con un sistema de control de acceso condicional a la programación desde la cabecera del cable se puede cifrar en unos 210.000 euros.

Por supuesto, no conviene olvidar que la distribución digital implica la existencia de *set-top boxes* digitales en casa de los abonados, con un coste entre los 100 y los 300 euros (para proveedores), a los que habrá que añadir el coste de instalación. En la Figura 5 se muestra un diagrama simplificado de este caso.

Si el operador de cable quiere generar su propia programación en digital a partir de programación recibida en banda base, ya sea de estudio, de reproductores de cinta, o de emisiones demoduladas provenientes de los transportes antes mencionados, deberá equipar codificadores MPEG por canal, seguidos de multiplexores y equipos de control. El coste de este tipo de equipamiento puede alcanzar los 50.000 euros por canal, sin tener en cuenta la generación propia de la programación, que puede oscilar desde los 25.000 euros por canal para un reproductor de vídeo, hasta cientos de miles de euros para estudios.

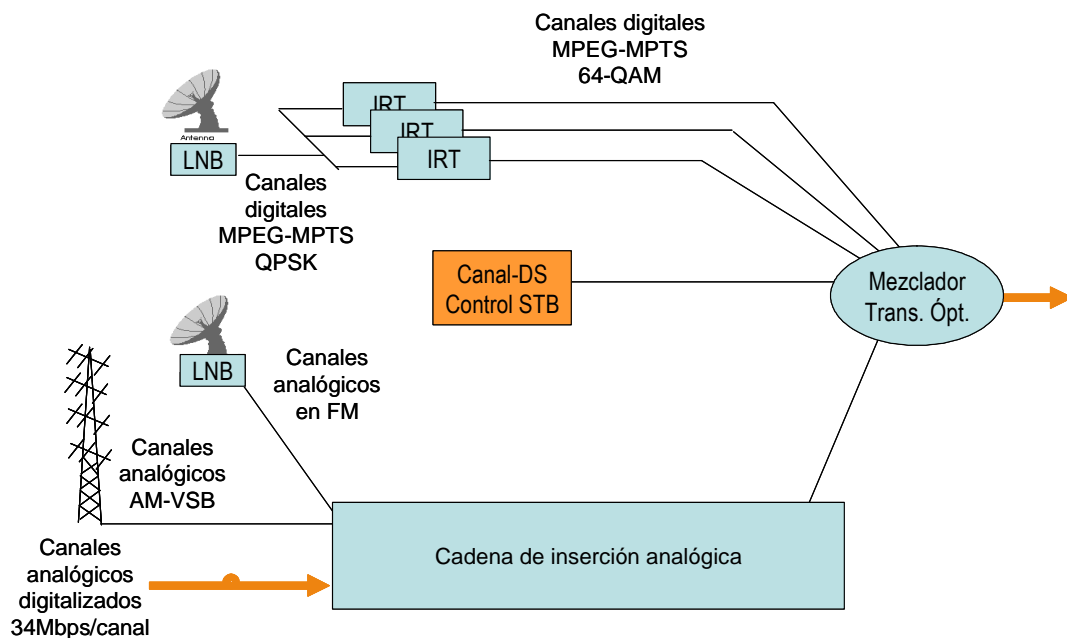


Figura 5. Cabecera con distribución digital y analógica

En la actualidad los operadores de cable nacen como operadores multiservicio (MSO), proporcionando además telefonía y servicios de datos (acceso a Internet de alta velocidad, servicios multimedia, etc.). Estos servicios se proporcionan mediante la red coaxial a usuarios residenciales y PYMEs (o incluso directamente con fibra en el caso de abonados de negocio), lo que requiere bidireccionalidad en la red de fibra-coaxial. Como ya se ha visto, el canal de retorno emplea la banda de 5 a 50 MHz, desde los usuarios, equipados con módems de cable y/o *set-top boxes*, hasta las terminaciones óptico-eléctricas. Desde éstas hasta la cabecera la información ascendente se envía normalmente por una fibra punto a punto.

En la Figura 6 se muestra la estructura de una cabecera HFC multiservicio. En el ejemplo se muestra el caso de telefonía integrada, sobre el mismo coaxial. Este esquema de transporte de voz normalmente se basa en multiplexado por división en

el tiempo (TDM). No obstante, no existe normalización al respecto, por lo que los fabricantes suelen utilizar soluciones propietarias. Un ejemplo podría ser la modulación de uno o varios sistemas de 30 canales telefónicos (de 64 kbit/s) sobre sendos canales ascendente y descendente del sistema de cable, los cuales se comparten entre los abonados de la tirada coaxial que parte del conversor electro-óptico. Esta configuración estaría basada en la E1 (2,048 Mbit/s) de la Red Telefónica Básica (RTB). Otro ejemplo, que podemos encontrar en las especificaciones de un fabricante, en este caso Nortel, describe el empleo de una portadora de 1,8 MHz (con 24 canales de 64 kbit/s) en el canal ascendente y otra portadora igual en el descendente, lo que permite 24 conversaciones simultáneas. Es decir que se equipara a un enlace T1 (1,544 Mbit/s) de la RTB. En cualquier caso los canales se prolongan desde cada conversor a la cabecera donde existe un módem que modula y demodula (QPSK) el tráfico ascendente y descendente intercambiado sobre el puerto de voz. En sentido ascendente se usa el espectro entre 5 y 50 MHz, coincidiendo con el canal ascendente para datos y compartiendo capacidad con este servicio. El canal descendente usa el espectro entre 375 MHz y 860 MHz, compartiendo también capacidad con otros servicios.

Los abonados disponen de los adaptadores telefónicos adecuados (*Cable Network Termination*, CNT) para hacer de interfaz entre el aparato telefónico y el coaxial, convirtiendo las señales telefónicas en señales de radiofrecuencia (RF), para su transmisión sobre la red HFC, y viceversa. La alimentación de los terminales telefónicos puede ser local (en el domicilio del abonado), a partir de la red de distribución de energía, con batería de respaldo para asegurar el servicio, o remota a partir de los NOT.

Existen protocolos, generalmente propietarios, para la asignación dinámica de los canales del cable a los abonados cuando se producen llamadas dirigidas a (u originadas por) los mismos. La cabecera incorpora un nodo de acceso (denominado *Host Digital Terminal* en terminología HFC) para controlar esta función desde el lado coaxial, que ofrece una interfaz, generalmente normalizada (V5.2 en Europa), hacia la red telefónica. En cualquier caso, los servicios de voz ofrecidos suelen disponer de las mismas funcionalidades que en las redes de conmutación de circuitos. Actualmente, se tiende a la integración sobre el mismo equipo del puerto de voz, del cable módem y del decodificador.

Para el acceso de datos se usa también la banda de 5 a 50 MHz en sentido ascendente, así como la banda por encima de los 550 a 860 MHz en sentido descendente. El elemento que recibe y envía los flujos de datos en la cabecera es el CMTS (*Cable Modem Termination System*). Este dispositivo realiza la codificación, modulación y gestión de acceso al medio compartido por los módems de cable, proporcionando una interfaz Ethernet. Esta interfaz se conecta a un conmutador Ethernet que interconecta el resto de dispositivos de datos que se puedan requerir en la cabecera, por ejemplo: un servidor AAA (*Authentication, Authorization and Accounting*), para control de acceso y tarificación; un servidor de contenidos locales y de almacenamiento (*caching*) para las páginas más accedidas; o un *router* que, además de las funciones habituales de encaminamiento, proporcione la terminación de línea hacia la red de datos.

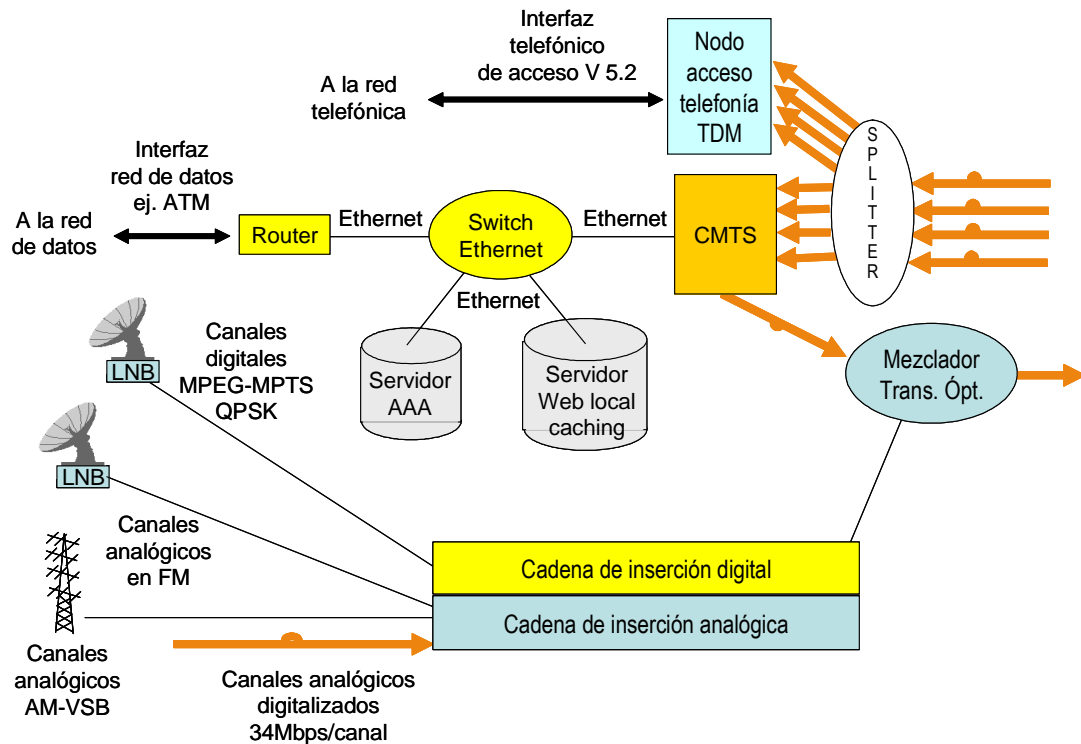


Figura 6. Cabecera HFC para todos los servicios, telefonía TDM

Hay que señalar que existen posibilidades distintas a la mostrada para ofrecer el servicio de telefonía. Algunos operadores de cable han optado por suministrar la telefonía a sus abonados mediante pares de cable que se despliegan en paralelo al coaxial. Se trata sobre todo de operadores que desplegaron su red antes de que los fabricantes ofreciesen integración de voz, datos y TV sobre un mismo cable, o cuando la tecnología aún no estaba suficientemente madura. La solución en este caso es el despliegue de una red telefónica superpuesta a la red de cable, con la que comparte canalizaciones y armarios, equipando concentradores telefónicos junto a los NOT. Este tipo de soluciones tiene como ventaja el no compartir el ancho de banda con otros servicios, así como disponer de la alimentación en el nodo de distribución.

Sin embargo actualmente los fabricantes y operadores tienden hacia soluciones de voz sobre IP (VoIP). Las técnicas de VoIP permiten el empleo de un único método de transmisión en el cable, al mismo tiempo que favorecen una utilización más eficiente del espectro. Esta solución requiere la existencia de mecanismos de control de calidad de servicio (QoS) que garanticen que los valores de pérdidas, retardos y fluctuaciones del retardo estén dentro de unos niveles adecuados. El estándar DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) provee estos mecanismos y permite garantizar la QoS de flujos de datos en tiempo real, como la voz, y así ofrecer el servicio de telefonía integrado con otros servicios.

En la Figura 7 se representa la configuración de cabecera para la provisión del servicio telefónico sobre IP. En este esquema, la voz y los datos comparten los mismos canales, obteniendo un tratamiento uniforme en la red HFC. El equipo de abonado es ahora un cable módem con una función de pasarela residencial de voz sobre IP (*VoIP Residential Gateway*), que codifica las señales del aparato telefónico adecuadamente para su transporte sobre IP.

En la figura se muestran elementos como la pasarela de VoIP, que permiten conectar una red de voz sobre IP con la red telefónica pública convencional. Estas pasarelas pueden estar ubicadas en cada cabecera o bien encontrarse centralizadas, pudiendo una misma pasarela atender a varias cabeceras. Asimismo, se muestra el servidor de llamadas que realiza todas las funciones de control de llamada, comunicándose vía IP con las diferentes pasarelas (las residenciales y centralizadas). Obsérvese que para la comunicación entre dos abonados de telefonía de la misma red de cable no es necesario pasar por la red telefónica pública, realizándose toda la comunicación sobre IP bajo el control del servidor de llamadas.

La parte de equipo de datos (CMTS, *router*, servidores, control, etc.) puede rondar los 57.000 euros el equipo básico (chasis más una o dos tarjetas) y unos 27.000 euros la tarjeta adicional. Un equipo de telefonía TDM estará en el mismo orden de magnitud. Los módem de cable se encuentran en el rango de 25 a 100 euros (coste para operadores).

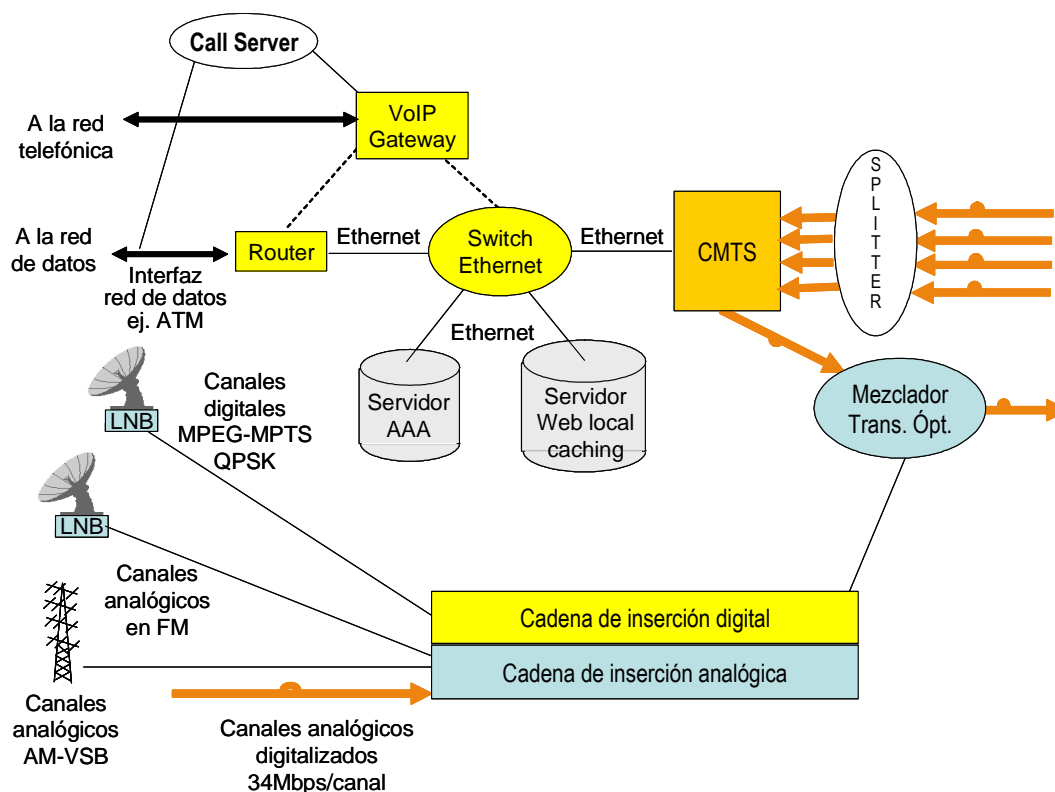


Figura 7. Cabecera HFC para todos los servicios, telefonía sobre IP

2.1.2.2 Red troncal

Normalmente, las redes troncales son redes ópticas con una topología a dos o tres niveles, lo que permite la cobertura de una gran área. En la Figura 8 se muestra un esquema de la topología de una red HFC, desplegada sobre un sistema de canalizaciones en anillo en tres niveles (anillos primario, secundario y terciario). Los valores numéricos que aparecen en la figura son estimativos.

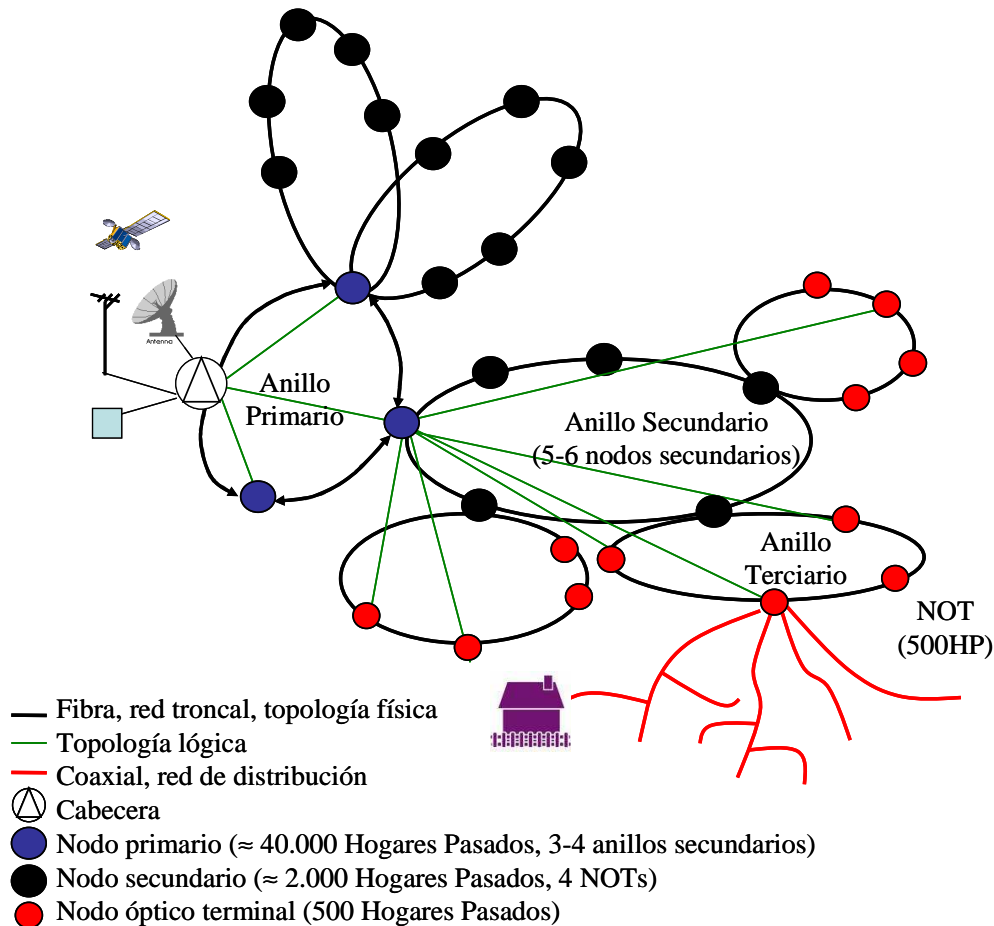


Figura 8. Troncal a tres niveles, transmisión hacia el usuario

Desde la cabecera hasta cada nodo primario se tiran fibras punto a punto a través de dos caminos directos redundantes, configurándose una topología en anillo. Las fibras para el resto de los nodos primarios, también punto a punto, discurren a través de las mismas canalizaciones pero sin tener conexión con el nodo primario. Esta estructura se repite en el resto de anillos. Un nodo primario atiende áreas que sirven entre miles y decenas de miles de abonados, tendiendo un enlace directo de fibra redundante hacia cada uno de los NOT que dependen de él. En el nodo primario se realiza una conversión de la señal óptica a RF y de nuevo a óptica, para insertar nuevos contenidos y para amplificar. El equipo básico que se suele encontrar en el nodo primario es:

- Hacia anillos secundarios: Equipos de recepción y transmisión HFC
- Cabeceras de cablemódems
- *Routers* de datos
- Armarios repartidores de fibra, coaxial y pares
- Equipo de alimentación y aire acondicionado

Estos nodos primarios, a su vez, amplifican y distribuyen la señal hasta los nodos secundarios a través de los anillos secundarios. Cada nodo primario suele servir unos 3 ó 4 anillos secundarios y en cada uno de ellos, típicamente, hay unos 5 ó 6 nodos secundarios, que dan servicio aproximadamente a unos 2000 hogares pasados cada uno. El nodo secundario simplemente es un repartidor de fibra hacia los NOT (unos cuatro), donde se realiza la conversión a la señal eléctrica que alimenta los cables coaxiales. Cada NOT, unido punto a punto por una fibra óptica de subida y otra de bajada a un nodo primario por un camino redundante, cubre habitualmente áreas de 500 usuarios (usualmente a partir de cuatro salidas cargadas aproximadamente con 125 hogares), aunque en sistemas con gran penetración de fibra el número se puede reducir a 100 e incluso a unas pocas decenas.

La Figura 9 representa un esquema de la cadena de transmisión en el enlace descendente, hay que tener en cuenta que el canal de retorno exige dos fibras adicionales en la red troncal desde cada nodo final al nodo primario correspondiente, y otras dos desde este hasta la cabecera.

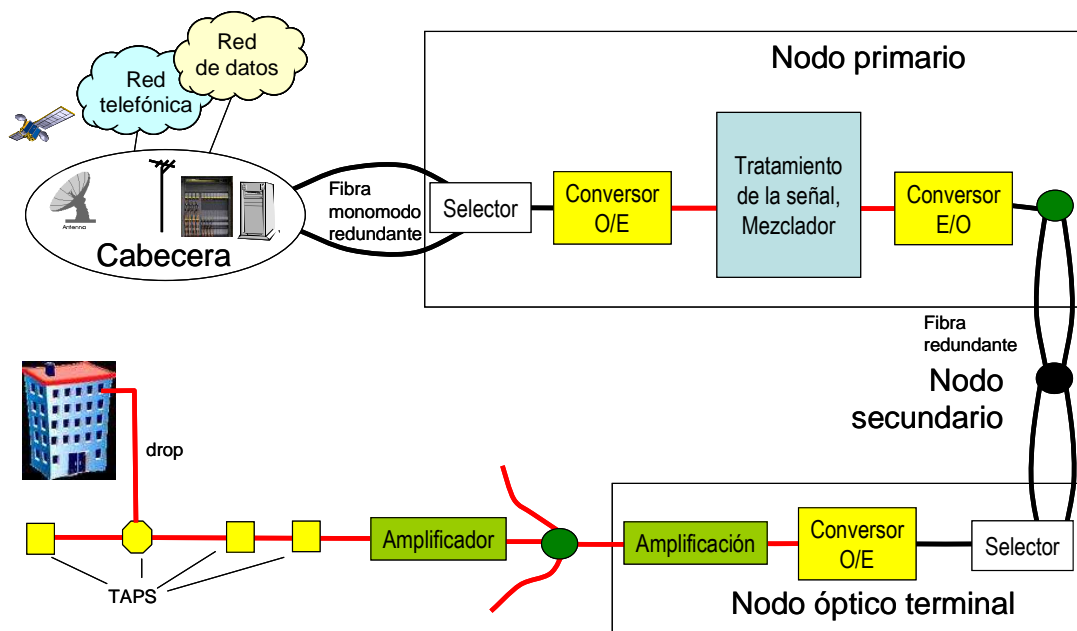


Figura 9. Esquema de la cadena de transmisión hacia el usuario

Los sistemas ópticos troncales pueden trabajar en la segunda (1330 nm) o tercera (1550 nm) ventana óptica. Los sistemas en tercera ventana tienen la ventaja de tener alcances mayores debido a que la atenuación de la fibra a estas longitudes de onda es mínima. Además, este alcance se puede ampliar con amplificación puramente óptica; motivo por el cual los nodos primarios se realizan con amplificadores ópticos de gran linealidad (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*, EDFA). De esta manera, se consigue permanecer en el dominio óptico desde la cabecera hasta las terminaciones de red (NOT). En el caso de la segunda ventana, no existen amplificadores ópticos comerciales; por lo que para amplificar la señal hay que efectuar una doble conversión (opto-eléctrica y electro-óptica). En ocasiones, la ventaja de la tercera ventana frente a la segunda puede convertirse en una desventaja. Como se ha indicado, los nodos primarios atienden áreas con decenas de miles de usuarios, lo cual puede corresponderse con ciudades o zonas que requieran la inserción de programación local. En la actualidad, esta inserción se realiza de forma económica a nivel eléctrico, algo disponible de forma “natural” en los nodos de segunda ventana. En cambio, la inserción a nivel óptico, usando multiplexación en longitud de onda, resulta hoy en día cara. Por estas y otras razones de coste de despliegue, existen sistemas de tercera ventana en el primer nivel troncal y de segunda ventana en el segundo nivel.

Por lo que respecta a los trayectos de transmisión de usuario a cabecera en la red troncal, una primera solución consiste en mantener los dominios de compartición del ancho de banda ascendente (y, consecuentemente, los dominios de colisión) circunscritos a cada área atendida por la tirada coaxial, es decir, al área atendida por un NOT. El canal descendente (potencialmente de mayor ancho de banda) se podría compartir por todos los abonados de la red. Esta sencilla configuración solamente requiere instalar un transmisor óptico en sentido ascendente en el NOT, un amplificador en el nodo primario y tiradas de fibra punto a punto entre cada NOT y la cabecera (con un punto de amplificación en el nodo primario), tal como se muestra en la Figura 10, en la que, para simplificar, se representa una red troncal de tan sólo dos niveles.

La solución que acaba de describirse, sin embargo, sólo es aceptable en redes muy pequeñas, ya que la compartición de la capacidad de bajada entre todos los usuarios de la red (entre decenas y cientos de miles en redes grandes) no proporciona los anchos de banda requeridos para servicios avanzados.

En caso de que los nodos primarios atiendan a miles o decenas de miles de usuarios, la solución más adecuada y extendida en la actualidad consiste en utilizar CMTS/HDT en cada nodo primario, accediendo a ellos a través de una red de transmisión convencional (por ejemplo, SDH sobre fibra), manteniendo los servidores en la cabecera. En esta solución, el dominio de compartición de ancho de banda ascendente sigue siendo el NOT. En sentido descendente, el dominio de compartición se establece por nodo primario, en vez de sobre la red en su totalidad. Además el número de fibras requeridas entre los nodos primarios y la cabecera se reduce. Esta solución se muestra en la Figura 11.

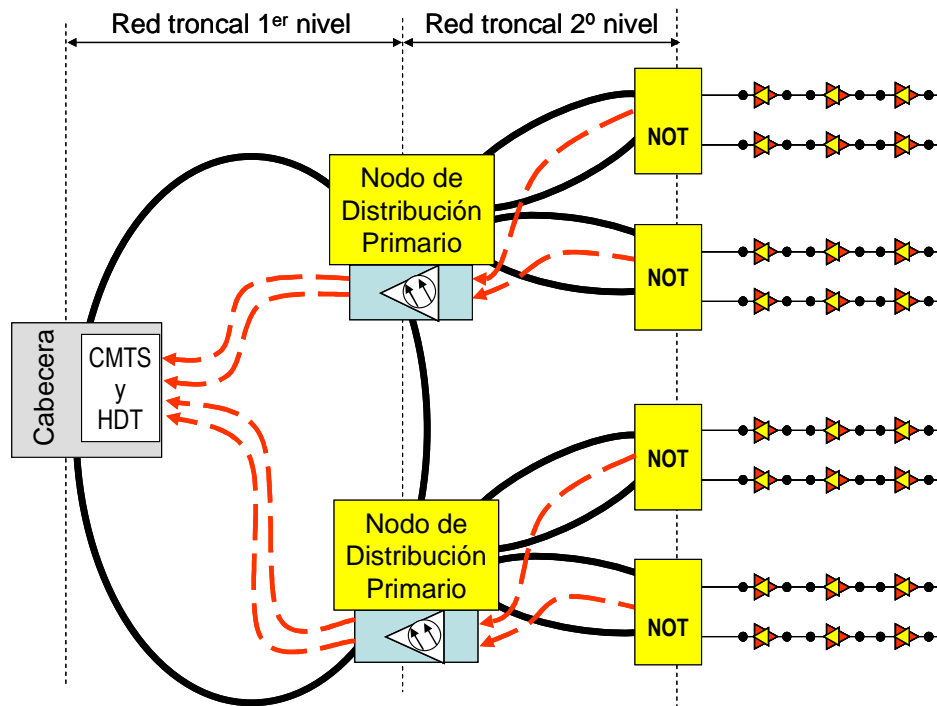


Figura 10. Implementación de canal ascendente en red troncal: aproximación 1

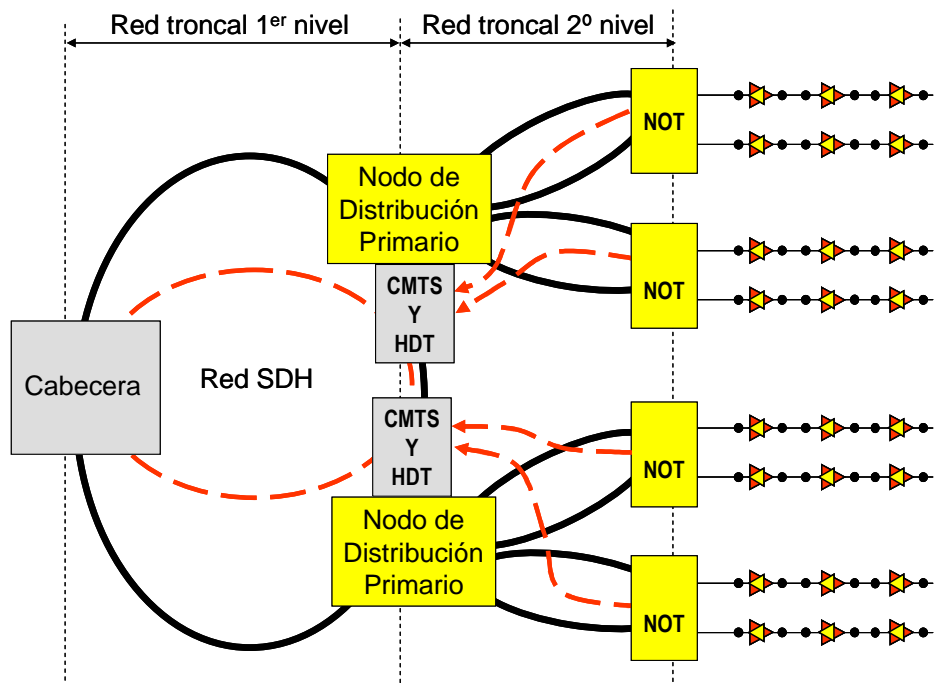


Figura 11. Implementación de canal ascendente en red troncal: aproximación 2

Nuevamente, la tendencia de evolución actual se dirige a la ubicación de funciones CMTS y HDT en la cabecera (*head-end consolidation*), utilizando técnicas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) en sentido descendente y de apilamiento de frecuencias FSS (*Frequency Stacking System*) en sentido ascendente. En esencia, se trata de enviar desde la cabecera el caudal descendente de servicios interactivos en una longitud de onda. De esta manera, la información contenida en esa longitud de onda, combinada con el canal descendente de TV analógica, se envía a un NOT (o grupo de NOTs, dependiendo de la penetración de los servicios). En sentido ascendente, la banda de 5-50 MHz de varios NOTs se desplaza en frecuencia, de manera que se forma un múltiple por división en frecuencia, que se puede usar para modular una longitud de onda, que a su vez se multiplexa en WDM en una fibra en sentido ascendente [3].

En la Figura 12 se muestra de manera simplificada el esquema resultante sobre una red de dos niveles. Cabe señalar que, en la práctica, suelen utilizarse mecanismos de redundancia como los expuestos anteriormente para los anillos de distribución.

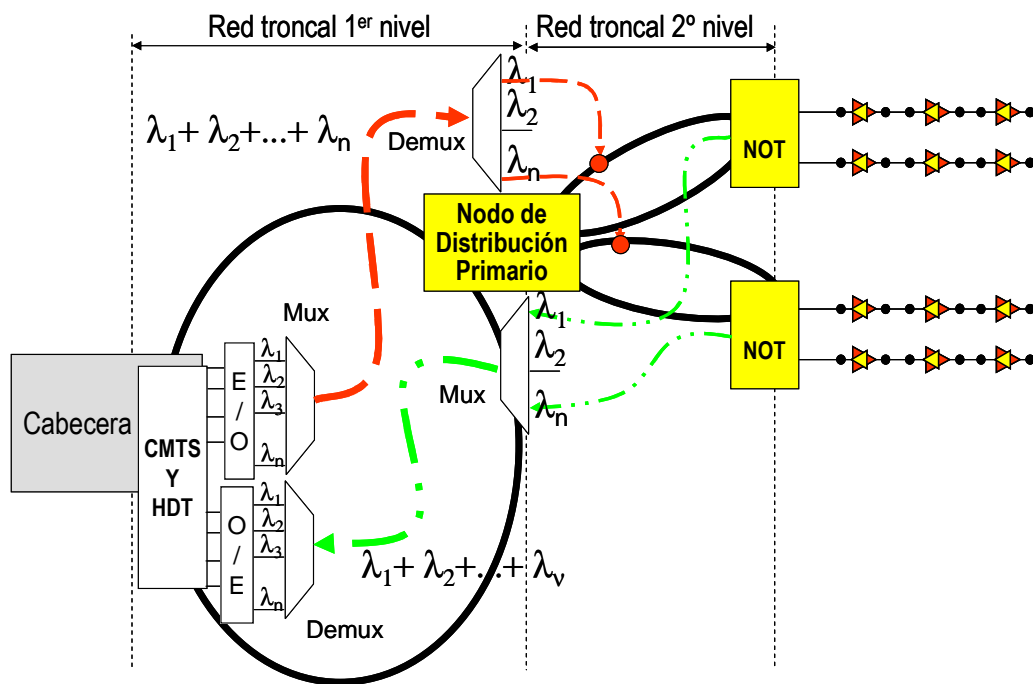


Figura 12. Red troncal utilizando DWDM

2.1.2.3 Red de distribución

La red de distribución HFC está basada en transporte mediante cable coaxial, siendo sus principales componentes los siguientes:

- Activos: amplificadores de línea (*Line-Extender*), cuyo diagrama simplificado puede verse en la Figura 13. Sus características más importantes son:
 - En sentido descendente, debe cumplir requisitos muy estrictos en lo que se refiere al ancho de banda a amplificar (50-860 MHz) y a potencia suministrada (debido a la importante atenuación del cable a estas frecuencias y las múltiples derivaciones que pueden existir hacia los usuarios). Por este motivo, se utilizan configuraciones de amplificación en paralelo (*power doubling*) o *feed forward* [2].
 - Por el contrario, en el sentido ascendente pueden utilizarse configuraciones más sencillas en *push-pull*, dado que el ancho de banda a cubrir en la parte baja del espectro es menor.
 - Los amplificadores de línea se telealimentan desde el NOT, normalmente en tensión alterna. Disponen también de una fuente de alimentación interna y proporcionan continuidad de alimentación hacia el siguiente extensor, si existe.
- Pasivos: los principales elementos pasivos son los *taps* (*Terminal Access Point*) que derivan parte de la energía que circula por el coaxial hacia las terminaciones donde se conectan las acometidas de usuario. Estas derivaciones se presentan en configuraciones multiterminal de dos, cuatro u ocho salidas. Otros elementos pasivos son los divisores de potencia que permiten derivar ramales coaxiales.

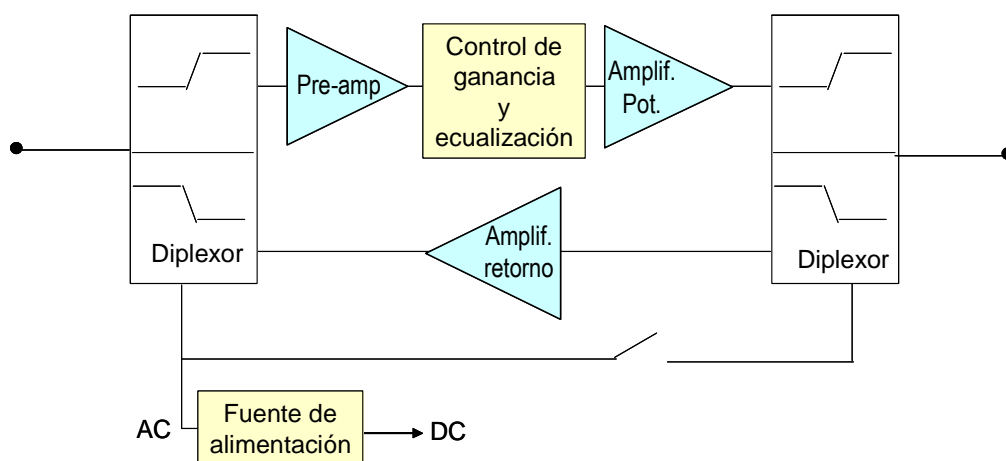


Figura 13. Esquema simplificado de extensor de línea coaxial

2.1.2.4 Equipos de Abonado

2.1.2.4.1 Módems de cable

La función de un módem de cable (CM) es convertir la red de cable en una vía transparente para el transporte de datos a alta velocidad, ofreciendo hacia el usuario interfaces estándar, normalmente 10/100 BaseT. En realidad, los módems funcionan

como pasarelas (*gateways*), pasando de un protocolo Ethernet al protocolo utilizado en la red de cable. En cabecera se hace el proceso de conversión inverso, realizándose además ciertas funciones de control sobre el sistema.

El módem de cable, junto con el equipo de cabecera, implementa los niveles físico y de control de acceso al medio (MAC). Los grupos de estandarización han editado especificaciones para ambos niveles (DOCSIS [4]), dejando a elección del fabricante las capas a ubicar sobre ellos. No obstante, en DOCSIS se establece como requisito el soporte de IP, así como de otros protocolos afines al mismo: SNMP (gestión); TFTP para descargas de programas y datos de configuración; DHCP para configuración dinámica de red de los ordenadores de usuario, e IGMP para gestión de grupos *multicast*.

2.1.2.4.2 Equipos relacionados con el servicio de distribución de televisión

Los sistemas de cable están diseñados para que las emisiones de televisión analógica en abierto puedan recibirse directamente por los receptores de TV estándar sin necesidad de ningún equipo de adaptación.

La digitalización y compresión de señales de vídeo permite la difusión simultánea de un número de canales cada vez mayor. Los canales de TV digital se transportan sobre flujos MPEG-TS, que multiplexan canales de vídeo, audio, datos e información sobre los programas estructurada en un conjunto de tablas (*Program Specific Information*, PSI). En España la banda que se reserva obligatoriamente para el servicio de TV digital va desde los 606 MHz a los 862 MHz, pero podría utilizarse más ancho de banda si el operador lo considerase necesario.

Dado el enorme parque existente de televisores analógicos, la aproximación más extendida es la utilización de adaptadores (*set-top boxes*) entre la toma coaxial (el dominio digital) y el receptor analógico de TV. Estos equipos disponen de una etapa de demodulación específica del medio de transporte (cable RF), efectuando también el procesamiento de la codificación e información de sistema MPEG/DVB. Para servicios de pago el *set-top box* (STB), además de las funciones de demodulación y decodificación, incorporará funciones específicas para acceso condicional. Cuando se trata de canales de pago analógicos se requiere también un STB con funciones de descodificación. El siguiente paso podría ser la integración de las funciones del STB en un receptor de televisión digital. Si bien existe este tipo de aparatos en el mercado, su presencia no pasa de ser anecdótica.

Entre los factores que confieren un valor diferencial a la TV digital cabe destacar la mejora de presentación y las facilidades de interacción que se ofrecen al usuario. Existen diversas técnicas para ofrecer TV interactiva. La selección de la más adecuada dependerá fundamentalmente de los requisitos de tiempo y capacidad de las funciones que se pretenden ofrecer al usuario.

Una posibilidad es utilizar las tablas con información sobre los programas (PSI), que se transportan en los flujos MPEG-TS. Éstas podrán ser manejadas por los STBs para ofrecer una gestión avanzada de canales; por ejemplo para conformar la guía electrónica de programas (*Electronic Programming Guide*, EPG) u ofrecer canales mosaico. Para ello, los equipos de abonado soportan aplicaciones programadas que

manejan la información de sistema y los flujos de datos que transportan los múltiplex proporcionando los servicios finales. Estas aplicaciones se desarrollan sobre plataformas de programación, inicialmente propietarias, que actualmente se basan en el empleo de interfaces de programación de aplicaciones (API). Así, por ejemplo, se ha definido la especificación *Multimedia Home Platform* (MHP), basada en JAVA, que proporciona APIs para el desarrollo de aplicaciones compatibles entre equipos de diversos suministradores [5]. De este modo la interactividad ofrecida es muy elemental, local al STB y no necesita utilizar el canal de retorno.

Para funciones más complejas que necesiten la interacción con elementos de la cabecera, pero que no tengan requisitos exigentes de tiempo o capacidad, el canal de retorno puede explotarse utilizando mecanismos de sondeo, con almacenamiento de peticiones en el STB que serán recogidas por la cabecera de forma periódica.

Para ofrecer servicios interactivos más avanzados, que requieran mayor capacidad o tengan requisitos de tiempo más exigentes, podría explotarse el canal de retorno usando DOCSIS si el STB incorpora funciones de módem de cable (CM). De este modo la televisión interactiva sería un servicio más ofrecido sobre IP/DOCSIS.

2.1.3 Normalización

2.1.3.1 DOCSIS

El estándar DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*), desarrollado por el consorcio CableLabs, es quizá el más importante dentro del ámbito de las redes de cable. Prueba de ello es su aceptación como estándar por UIT [6], ETSI [7] y SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers). Hasta la fecha, se han definido cuatro versiones de DOCSIS. En la Tabla 1 se indican, de manera resumida, algunas de las principales características de cada versión.

Tabla 1. Versiones de DOCSIS

Estándar	Prestaciones	Servicios y beneficios
DOCSIS 1.0 5 Mbit/s de subida	Especificación estándar	Alta velocidad de datos Acceso a Internet
DOCSIS 1.1 10 Mbit/s de subida	Calidad de Servicio Seguridad	Doble capacidad en retorno Bajo costo
DOCSIS 2.0 <i>Advanced PHY</i> 30 Mbit/s de subida	S- CDMA A-TDMA	Servicios simétricos Punto-a-Punto <i>Business-to-business</i> (B2B)
DOCSIS 3.0 Cualquier capacidad (en ambos sentidos)	Vinculación de canales QoS para <i>multicast</i> IPv6	Vídeo sobre IP

Uno de los aspectos más importantes que introdujo la versión DOCSIS 1.1 es el soporte de servicios con garantías de QoS, para servicios sensibles al retardo. Este tipo de servicios se añade al servicio sin garantías (*best effort*), el único considerado en DOCSIS 1.0.

La versión DOCSIS 2.0 introdujo una serie de novedades adicionales, incluyendo las que permiten el desarrollo de módems de bajo coste, el soporte de servicios simétricos, mayor inmunidad frente al ruido y servicios IP *multicast*. Esta versión define también dos nuevos métodos de modulación: S-CDMA (*Synchronous Code Division Multiple Access*) y A-TDMA (*Advance frequency agile Time Division Multiple Access*).

Otro de los aspectos más destacables del estándar DOCSIS 2.0 es la especificación de una arquitectura abierta, cuya estructura básica se ilustra en la Figura 14. Por último, cabe señalar que el estándar DOCSIS 2.0 garantiza la compatibilidad con las versiones DOCSIS 1.0 y 1.1.

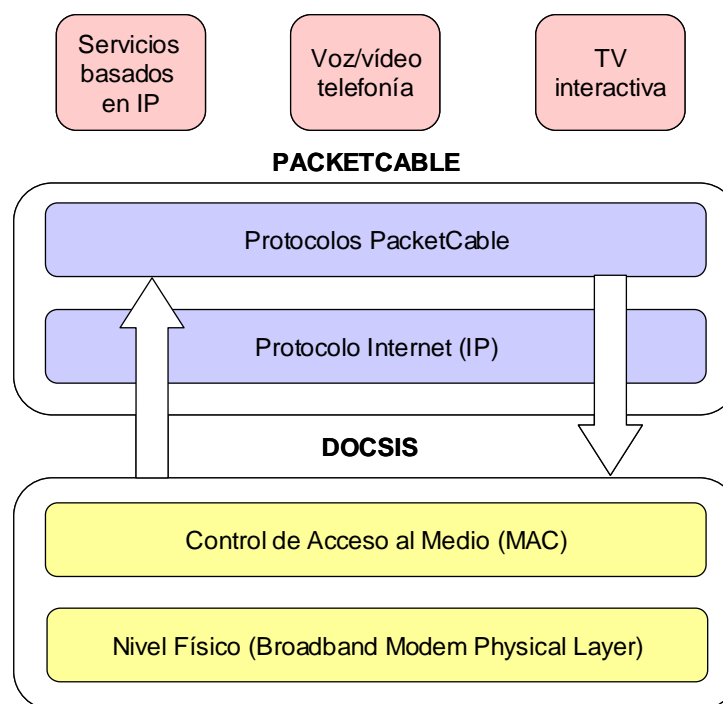


Figura 14. Arquitectura abierta de DOCSIS 2.0

Entre las novedades que aporta DOCSIS 3.0 se pueden destacar: la vinculación de canales (que como se ha visto permite canales de ancho de banda “a medida”) soporte para IPv6, soporte para IP *multicast* y mejoras en la seguridad. La compatibilidad con las versiones anteriores también está garantizada.

En julio de 2007 el grupo de estudio 9 de la UIT recomendó que DOCSIS 3.0 se convierta en un estándar internacional.

Además de las especificaciones DOCSIS, el consorcio CableLabs [8] lleva a cabo una serie de proyectos, como son:

- PacketCable: iniciativa para desarrollar especificaciones de interfaces para servicios multimedia en tiempo real sobre IP (telefonía IP, conferencias multimedia, juegos interactivos, etc.)
- OpenCable: cuyo objetivo es definir la especificación hardware y software de una plataforma común para el desarrollo de servicios interactivos (*OpenCable Applications Platform*, OCAP), salvando el problema de los sistemas operativos propietarios. Dentro de este proyecto participan 90 compañías diferentes, entre las que se encuentran ATT, Microsoft, Motorola, Philips y Siemens.
- Go2Broadband (G2B): servicio de CableLabs para la venta de servicios de cable.
- CableHome: un proyecto para desarrollar las especificaciones necesarias para extender los servicios de cable en casa, con calidad de servicio, interoperatividad de dispositivos y manejo de red.
- VOD Metadata: desarrollo de especificaciones para Vídeo bajo Demanda (*CableLabs Video-on-Demand Content Specification V1.0*).

Dentro del ámbito europeo, ETSI especificó una extensión de DOCSIS conocida como euroDOCSIS. Se trata del estándar ES 202 488-2 V1.1.1 (*Access and Terminals; Second Generation Transmission Systems for Interactive Cable Television Services - IP Cable Modems*), de septiembre de 2003, que actualiza a su predecesor ES 201 488 V1.2.2 (*Access and Terminals, Data Over Cable Systems*). Dicho estándar se compone de tres partes: General, Especificación de la interfaz RF y Especificación de seguridad. Básicamente añade el anexo N en el que se particularizan algunos aspectos para el contexto europeo.

Por otro lado en la especificación de la capa física de DOCSIS 3.0 (CM-SP-PHYv3.0-I07-080522) el Anexo B incluye las adiciones y modificaciones para la especificación europea.

Así mismo, se debe mencionar la disponibilidad de la especificación de ETSI TS 101 909 V1.4.1 (*Digital Broadband Cable Access to the Public Telecommunications Network; IP Multimedia Time Critical Services*), de abril de 2006, también conocida como IPCablecom. Este estándar de 28 partes (algunas reservadas para su uso en el futuro) especifica un conjunto de protocolos y requisitos funcionales asociados desarrollados para proporcionar servicios IP multimedia seguros con requisitos exigentes de tiempo y QoS sobre redes HFC.

2.1.3.2 Características del Nivel Físico

Las redes de TV por cable explotan un gran ancho de banda, por lo que son sistemas intrínsecamente de multiplexado por división en frecuencia (FDM). El canal de retorno, aunque de menor capacidad, también sigue una estructura FDM.

Los módems de cable se sintonizan automáticamente (*frequency agile*), es decir, pueden transmitir y recibir señales en cualquiera de las frecuencias de los canales ascendentes y descendentes.

Las portadoras emitidas desde la cabecera se colocarán junto con los canales de TV difundidos, en cualquier espacio libre en el rango de frecuencias para el enlace descendente, que es distinto en DOCSIS y en su versión europea, euroDOCSIS. La Tabla 2 muestra el ancho de banda de los canales descendentes, las modulaciones permitidas y el régimen binario resultante en ambas versiones.

Tabla 2. Canales descendentes en DOCSIS y euroDOCSIS

	DOCSIS		euroDOCSIS	
Banda	111 a 867 MHz (opcional hasta 999)		112 a 858 MHz	
Canales	6 MHz		7/8 MHz (8 MHz para datos)	
Símbolo/s (Baudios)	64QAM	5,056941 M	6,952 M (tanto para 64QAM como para 256QAM)	
	256QAM	5,360537 M		
Régimen binario (bit/s)	64QAM	30,341646 M	64QAM	41,712 M
	256QAM	42,884296 M	256QAM	55,616 M
Capacidad con vinculación de canales	160 Mbit/s		160 Mbit/s	

Los datos se organizan en paquetes *MPEG-Transport Stream*, de 188 octetos por paquete (los mismos que se usan en TV digital), con una cabecera específica para datos, lo que permite la multiplexación de datos y vídeo/audio en un mismo canal.

La ubicación de las portadoras ascendentes resulta más complicada debido al abundante ruido en la zona más baja del espectro, así como a la existencia de otros servicios como la telefonía.

DOCSIS establece para el sentido ascendente el empleo de distintas modulaciones, desde QPSK hasta 128 QAM, que se puede utilizar exclusivamente cuando se usa el modo S-CDMA no con TDMA, con velocidades de símbolo de 160, 320, 640, 2560 y 5120. La Tabla 3 muestra las posibilidades de capacidad en un canal físico en el sentido ascendente, así como los ancho de banda ocupados por estos canales.

En DOCSIS 3.0 las capacidades de 160, 320 y 640 kBaudios son opcionales para ofrecer compatibilidad con versiones anteriores. La especificación europea para DOCSIS 1.1 (ETSI ES 201 488-2) se aprobó en diciembre de 2002. En el mismo mes apareció en EE.UU. la versión DOCSIS 2.0, que multiplica las capacidades del canal ascendente gracias a la introducción de nuevas modulaciones y el uso de un esquema FDMA/TDMA/S-CDMA además del FDMA/TDMA que se utilizaba en las versiones anteriores. En DOCSIS 3.0 se incluye además el uso de canales de 6,4 kHz de ancho de banda.

Tabla 3. Velocidad vs. ancho de banda, canal ascendente

kBaudio ksimb/s	QPSK kbit/s	8 QAM kbit/s	16QAM kbit/s	32 QAM kbit/s	64 QAM kbit/s	128 QAM Solo modo S-CDMA kbit/s	Ancho de banda kHz
160	320	480	640	800	960	1120	200
320	640	960	1280	1600	1920	2240	400
640	1280	1920	2560	3200	3840	4480	800
1280	2560	3840	5120	6400	7680	8960	1600
2560	5120	7680	10240	12800	15360	17920	3200
5120	10240	15360	20480	25600	30720	35840	6400
Capacidad con vinculación de canales				160 Mbit/s			

El uso de los modos TDMA o S-CDMA se configura por el CMTS utilizando mensajes MAC. Un esquema FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) implica el uso de distintas portadoras (canales RF) en la banda del enlace ascendente, de modo que un módem de cable transmite con una portadora determinada. Usar TDMA implica que la transmisión en sentido ascendente es a ráfagas, de modo que un canal RF se comparte por varios módems que no transmiten simultáneamente. Por último el esquema S-CDMA implica que varios módems pueden transmitir simultáneamente y usando la misma portadora siempre que utilicen códigos ortogonales.

Estos sistemas crecen de forma escalonada en función de la demanda. Al poner en marcha un servicio, en principio se habilita una sola portadora descendente y otra ascendente, a las que estarán sintonizados todos los usuarios. En el caso de los sistemas asimétricos es frecuente que haya varias portadoras ascendentes (3 ó 4) asociadas a cada canal descendente. A medida que crece el número de usuarios, se habilitan más portadoras entre las que se reparten todos los abonados.

El módulo de cabecera indica a cada módem qué par de portadoras ha de sintonizar. Si se detecta una degradación de los parámetros de calidad de alguna de ellas (interferencias, alto nivel de ruido, exceso de tráfico etc.), se puede indicar a los módems que pasen a ocupar una portadora distinta. Estas tareas se realizan con herramientas de gestión de red que desde cabecera evalúan un conjunto de parámetros y efectúan cambios dinámicamente.

DOCSIS 3.0 añade una nueva posibilidad para aumentar el ancho de banda ofrecido al usuario: la vinculación de canales (*channel bonding*). Esta función consiste en vincular varios canales físicos (al menos cuatro) y convertirlos en un único canal lógico de mayor ancho de banda. De este modo se podrían conseguir canales con cualquier ancho de banda. Los operadores de cable han marcado el objetivo de ofrecer canales de hasta 160 Mbit/s en ambos sentidos. La flexibilidad y la

escalabilidad asociadas a este concepto aportan a los operadores un alto grado de precisión para ofrecer la capacidad necesaria a un cliente determinado.

El hecho de que los paquetes lleguen por distintos canales, que pueden tener distintas características, provoca que los paquetes puedan llegar desordenados y sea necesario reordenarlos en recepción. DOCSIS limita la latencia, provocada porque paquetes que ya han llegado tengan que esperar alguno anterior, a 18 ms, de modo que si en este tiempo no se recibe el paquete se considera perdido. Para aplicaciones en las que el retardo sea crítico, por ejemplo voz sobre IP, es importante que los canales a enlazar tengan comportamientos muy similares.

2.1.3.3 Alternativas para acceder a un medio compartido

Con objeto de permitir la asignación dinámica de ancho de banda a los usuarios, se podrían usar dos estrategias.

Acceso por contienda. Algunos módems de cable para sistemas simétricos usan técnicas como la CSMA/CD de redes locales tipo Ethernet, pero adaptadas a las redes de cable, basadas en el protocolo IEEE 802.7. La aplicación de estas técnicas en redes de cable no es muy adecuada debido al desperdicio ancho de banda asociado a la resolución de colisiones. La probabilidad de colisión es elevada dada la distancia entre el usuario y la cabecera, siendo el comportamiento impredecible para altas cargas de tráfico.

Acceso mediante solicitud-reserva. En este caso la cabecera deja de ser un mero repetidor y pasa a controlar el acceso al canal ascendente al mismo tiempo que es el único transmisor en el canal descendente. Este método es habitual en los sistemas asimétricos en donde varios canales ascendentes se encuentran asociados a cada canal descendente. Un conjunto de módems tiene que transmitir por un mismo canal hacia un único órgano de cabecera que es quien indica cuándo y cómo lo pueden hacer. Para ello, el canal ascendente se estructura en mini-intervalos de tiempo, pudiendo cada estación empezar a transmitir al comienzo de uno de los mini-intervalos. Cuando un módem tiene que transmitir solicitará a cabecera un determinado número de mini-intervalos. La cabecera emite periódicamente información por el canal descendente indicando cual será la utilización que se haga de cada uno de los mini-intervalos en el siguiente periodo. Cada mini-intervalo tiene asignado un uso determinado: a) mini-intervalos reservados para la transmisión de datos desde una determinada estación; b) mini-intervalos para solicitudes, accesibles por contienda, utilizados por las estaciones con datos pendientes de transmitir para enviar sus peticiones de reserva; y c) mini-intervalos para datos en modo contienda, accesibles por todas las estaciones (o sólo algunas de ellas) para transmitir datos.

En los accesos por contienda, tanto para solicitudes como para datos, la estación de cabecera debe confirmar la correcta recepción de los paquetes. En caso contrario, la estación emisora tendrá que retransmitir su paquete en la siguiente oportunidad, asumiendo que en la anterior hubo una colisión.

La cabecera ha de indicar la utilización de cada mini-intervalo con suficiente antelación, teniendo en cuenta el tiempo que tardará en llegar este mensaje a las

estaciones más alejadas, el tiempo de proceso de éstas y el retardo de propagación de las mismas hasta cabecera. Esto da origen a las limitaciones de distancia de estos sistemas. Así, en DOCSIS se establece un máximo de 100 millas entre el CMTS y el terminal más distante, y para la diferencia entre las distancias desde el CMTS al terminal más distante y al más cercano, aunque típicamente los operadores despliegan con distancias de 15 millas. En euroDOCSIS la distancia se limita a 160 km. Si se usara fibra en todo el trayecto entre CMTS y CM y se utilizaran las distancias máximas el tiempo de ida y vuelta máximo sería de 1,6 ms, es decir un retardo máximo de 0,8 ms, sin embargo típicamente el retardo es mucho menor.

El controlador de cabecera transmite una referencia temporal periódicamente para que las estaciones estén sincronizadas. Este dato, junto con el retardo entre cada estación y la cabecera, es suficiente para que los datos lleguen alineados temporalmente a la cabecera. Por otro lado, el control de la asignación de ancho de banda por parte de la cabecera permite garantizar la calidad de servicio a cada estación y definir distintos tipos de servicio. De este modo, se permite garantizar un caudal máximo o mínimo a las estaciones que lo soliciten (el controlador les asignará periódicamente mini-intervalos de forma dedicada), e incluso el soporte de servicios en tiempo real (conversaciones telefónicas) con garantías de calidad de servicio.

Al realizarse la transmisión sobre un medio compartido se requieren medidas de seguridad, tanto para los datos del usuario como para evitar que alguien acceda a un servicio haciéndose pasar por otro abonado. En DOCSIS se define un sistema de seguridad (*Baseline Privacy*), a nivel MAC, basado en cifrado de datos DES (*Data Encryption Standard*). Igualmente, se define una extensión del protocolo MAC para el intercambio de claves.

2.1.3.4 Niveles superiores

En principio los módems de cable fueron pensados para implementar el nivel físico y el de control de acceso (MAC), ofreciendo una vía transparente de comunicación de datos tipo red de área local. Como se ha visto anteriormente, DOCSIS requiere que los módems implementen ciertos protocolos de niveles superiores que faciliten su gestión.

Los módems se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- 1) Módems que implementan el nivel físico y MAC de forma transparente, comportándose como simples puentes, dejando a elección del usuario el empleo de cualquier tipo de protocolo sobre ellos.
- 2) Módems que encaminan tráfico IP. Algunos sistemas de módems de cable tienen como objetivo el transporte transparente de tráfico IP entre los usuarios y cabecera, donde se instala un *router* que lo encamina hacia un canal descendente o hacia otro destino en una red diferente.
- 3) Módems basados en ATM. Fragmentan los paquetes de datos en células ATM (53 octetos) y utilizan los protocolos de señalización ATM para proporcionar diferentes clases de servicios. Este tipo de módems

proporcionan: a) plataformas multiservicio, b) gestión de calidad de servicio, c) creación de redes locales virtuales (VLANs), d) posibilidad de integrar voz y datos sobre ATM, e) acceso Ethernet en el módem y f) comportamiento como puente (*bridge*) transparente. En DOCSIS está prevista la definición para el soporte de ATM.

2.1.3.5 Gestión de QoS

DOCSIS incluye varios conceptos relativos a la calidad de servicio (QoS), entre ellos:

- Clasificación de paquetes e identificación de flujos
- Manejo de la calidad de servicio de flujos de servicio
- Establecimiento dinámico de servicio
- Fragmentación
- Modelo de activación en dos fases

El principal mecanismo para proporcionar QoS es clasificar los paquetes en la interfaz MAC en flujos de servicio.

2.1.3.5.1 Flujos de servicio

El concepto de flujo de servicio es fundamental para gestionar la QoS. Un flujo de servicio es un flujo unidireccional de paquetes (en sentido ascendente o descendente) que proporciona una calidad de servicio determinada. Los CM y CMTS proporcionan esta calidad de servicio conformando, controlando y priorizando el tráfico de acuerdo a un conjunto de parámetros de QoS definidos para el flujo de servicio. Así, un flujo de servicio se caracteriza por un conjunto de parámetros de QoS como pueden ser latencia, fluctuación del retardo o caudal. Estos parámetros incluyen detalles de cómo el CM solicita mini-intervalos y sobre el comportamiento que se espera del CMTS.

2.1.3.5.2 Clasificadores

Otro elemento fundamental en la gestión de QoS es el clasificador. Un clasificador es un conjunto de propiedades que se comprueban para cada paquete de la red. Estas propiedades incluyen parámetros del paquete (por ejemplo la dirección IP destino), una prioridad del clasificador y una referencia al flujo de servicio. Si el paquete concuerda con los parámetros indicados se entrega al flujo de servicio referenciado. La clasificación de paquetes en el CM y el CMTS se conforma con múltiples clasificadores. Cada clasificador contiene un campo de prioridad que determina el orden de búsqueda del mismo, de modo que el de mayor prioridad se aplica primero.

2.1.3.5.3 Servicios de manejo de flujos de servicio en el enlace ascendente

La norma describe un conjunto de servicios de manejo de los flujos en el enlace ascendente, así como los parámetros de QoS asociados a cada uno de estos servicios. Por otro lado se especifica cómo se pueden combinar estos servicios básicos y los parámetros de QoS para ofrecer nuevos servicios.

Los servicios de manejo de flujos se diseñan para mejorar la eficiencia del proceso de sondeo/asignación, de modo que, especificando el servicio y sus parámetros de QoS asociados, el CMTS puede anticipar el caudal y la latencia que necesita el tráfico en sentido ascendente y proveer los sondeos y/o asignaciones de mini-intervalos en los instantes apropiados.

Cada servicio está relacionado con un tipo de flujo de datos determinado. Los servicios básicos son:

- Servicio de asignación sin solicitud (*Unsolicited Grant Service*, UGS)
- Servicio de sondeo en tiempo real (*Real-Time Polling Service*, rtPS)
- Servicio de asignación sin solicitud con detección de actividad (*Unsolicited Grant Service with Activity Detection*, UGS-AD)
- Servicio de sondeo sin tiempo real (*Non-Real-Time Polling Service*, nrtPS)
- Servicio sin garantías (*Best Effort*, BE)

2.1.3.5.3.1 Servicio de asignación sin solicitud

Este servicio ha sido diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real que generen paquetes de tamaño fijo de forma periódica, como por ejemplo tráfico de voz sobre IP. El servicio ofrece mini-intervalos asignados de tamaño fijo de forma periódica, lo que elimina la sobrecarga y la latencia de las peticiones del CM para hacer la reserva de los mismos.

Los parámetros de QoS que se deben considerar son: el número de mini-intervalos asignados, el tiempo nominal entre mini-intervalos, la fluctuación del retardo tolerada para los mini-intervalos asignados y la política de solicitud/transmisión.

2.1.3.5.3.2 Servicio de sondeo en tiempo real

Se diseña para soportar flujos de servicio en tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de forma periódica, como por ejemplo vídeo MPEG. El CMTS ofrece específicamente al CM (*unicast*) de forma periódica oportunidades de solicitud que serán conformes a las necesidades de tiempo real del flujo y permitirán al CM especificar el número de mini-intervalos deseados. Por consiguiente se necesita una sobrecarga mayor en sentido ascendente, debido a las solicitudes que tiene que enviar el CM, pero a cambio el número de mini-intervalos puede ser ajustado a las necesidades cambiantes del CM, lo que optimiza la eficiencia en cuanto al transporte de datos.

Los parámetros de QoS más relevantes para este servicio son: el periodo nominal de sondeo, la fluctuación del retardo tolerada para el sondeo y la política de solicitud/transmisión.

2.1.3.5.3.3 Servicio de asignación sin solicitud con detección de actividad

Se diseña para soportar flujos de tipo UGS que pueden estar inactivos durante un periodo significativo de tiempo (del orden de decenas de ms o más), por ejemplo voz sobre IP con supresión de silencios. Se proporcionan mini-intervalos asignados

sin solicitud cuando el flujo está activo y sondeos dirigidos al CM en situación de inactividad del flujo. De modo que se combinan los dos servicios anteriores consiguiendo la baja sobrecarga y la baja latencia del servicio de asignación sin solicitud con el buen aprovechamiento del ancho de banda del servicio de sondeo en tiempo real. El CMTS detectará la inactividad del flujo cuando observe que hay mini-intervalos no utilizados, pero el algoritmo para cambiar de modo asignación sin solicitud a modo sondeo periódico dependerá de la implementación del CMTS.

Los parámetros de QoS fundamentales en este servicio son: el periodo nominal de sondeo, la fluctuación del retardo tolerada para el sondeo, el periodo nominal entre mini-intervalos asignados, el número de mini-intervalos asignados sin solicitud y la política de solicitud/transmisión.

2.1.3.5.3.4 Servicio de sondeo sin tiempo real

Se diseña para soportar flujos que no sean en tiempo real y requieran un número variable de mini-intervalos de forma regular, como por ejemplo tráfico FTP de gran ancho de banda. El servicio ofrece sondeos dirigidos específicamente al CM (*unicast*) de forma regular, lo que asegura que el flujo recibe las oportunidades de solicitud incluso en situación de congestión de red. El CMTS usualmente sondea el flujo en un intervalo (periódico o no) del orden de un segundo o menos.

Los parámetros de QoS fundamentales son: el intervalo nominal de sondeo, la tasa de tráfico mínima reservada, la tasa de tráfico máxima mantenida, la prioridad del tráfico y la política de solicitud/transmisión.

2.1.3.5.3.5 Servicio sin garantías

Se diseña para proporcionar un servicio eficiente para el tráfico sin garantías (*best effort*). La política de solicitud/transmisión debe asegurar que el CM puede utilizar las oportunidades de contienda difundidas, así como las oportunidades de solicitud dirigidas a él y los mini-intervalos que le sean asignados. Los parámetros de QoS básicos para este servicio son: la tasa de tráfico mínima reservada, la tasa máxima mantenida y la prioridad del tráfico.

Por otro lado DOCSIS 3.0 introduce funciones para controlar la priorización de datos reenviados a través de un CM así como mecanismos para configurar la calidad de servicio para tráfico *multicast* en sentido descendente.

2.1.4 Madurez de la tecnología y del mercado

Las redes de acceso HFC pueden considerarse como una tecnología de banda ancha madura y utilizable. No obstante, cabe señalar que es una tecnología en continua evolución, encaminada hacia el soporte de mayores anchos de banda en el canal ascendente y hacia la integración de servicios.

2.1.4.1 Tecnología

CableLabs [8] es un consorcio de diferentes empresas de televisión por cable (46 en febrero de 2009) para investigar e identificar nuevas tecnologías de banda ancha, así

como para la autorización de especificaciones y la certificación de productos. Ha elaborado el estándar de módem de cable (CM) y el sistema terminal de módem de cable (*Cable Modem Terminating System*, CMTS), formalmente conocido como DOCSIS, que permite la interoperatividad y escalabilidad entre módems de cable de diferentes fabricantes.

En diciembre de 2008, existían 115 tipos de módems de cable certificados con DOCSIS 2.0 y sólo 19 con DOCSIS 3.0. En lo que se refiere a sistemas CMTS, el número de equipos certificados era de 14 y 8, respectivamente. En esa fecha, 112 empresas tenían algún producto certificado con Cablelabs.

La tendencia de la tecnología de equipos de usuario es a integrar en un mismo equipo el puerto de voz, el cable módem y el decodificador.

2.1.4.2 Mercado

La tendencia de las operadoras de cable es la progresiva sustitución de la planta de coaxial por fibra óptica, acercando la fibra hacia el usuario (FTTH, FTTC). En las nuevas operadoras, lo habitual es desplegar la red troncal con fibra óptica y la red de distribución con coaxial. A medida que los equipos ópticos sean más asequibles, más se acercará la fibra óptica al usuario.

Como estimación del mercado de esta tecnología la Tabla 4 [9] presenta el volumen de negocio durante el tercer trimestre de 2007 de los fabricantes más importantes, indicando el número de unidades vendidas de adaptadores terminales multimedia embebidos (*embedded multimedia terminal adapters*, E-MTAs), que combinan funcionalidad CM con adaptadores de teléfono IP basados en PacketCable; CM y dispositivos DOCSIS en general.

Tabla 4. Ventas de los principales fabricantes de dispositivos DOCSIS

Fabricante	E-MTAs	Tasa de mercado	CMs	Tasa de mercado	Dispositivos DOCSIS	Tasa de mercado
Motorola	719	19.7%	1.928.000	43.4%	2.647.000	32.4%
Scientific Atlanta	528.148	14.4%	979.128	22%	1.569.671	19.2%
Ambit	99.730	2.7%	635.540	14.3%	735.270	9%
Thomson	231.983	6.3%	251.116	5,7%	483.099	5.9%
Arris	1.966.637	53.8%	106.790	2.4%	2.073.427	25.4%
Otros	110	3%	540	12.2%	650	8%
Total	3.655.498	100%	4.440.574	100%	8.158.467	100%

En cuanto a la implantación de DOCSIS 3.0, en diciembre de 2007 comenzaron a hacerse las primeras certificaciones. Esta tecnología está disponible en algunos países asiáticos y zonas de EE.UU. En Europa se ofrece en Reino Unido, Francia, Holanda y Austria. En España ONO anunció [10] que, gracias a la introducción de la

tecnología DOCSIS 3.0, el 15 de octubre de 2008 comenzaría a ofrecer, en diez municipios de la Comunidad de Madrid, nuevos servicios de acceso a Internet con velocidades de navegación a 100 y 50 Mbit/s de bajada y 5 y 3 Mbit/s de subida, respectivamente, garantizando que se cumple de manera holgada con la exigencia, impuesta a los operadores por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, de garantizar la disponibilidad del 80% de la velocidad contratada por sus clientes. El precio del paquete de teléfono todo incluido y banda ancha a 50 Mbit/s comenzaría siendo de 60 euros mensuales y el de 100 Mbit/s de 80 euros. Este operador da servicio en la mayoría de las demarcaciones del país.

2.1.5 Prestaciones

En la mayoría de los casos, la topología de red es transparente para los módems, que simplemente exigen una serie de parámetros de calidad de servicio (QoS) en la transmisión para garantizar su correcto funcionamiento. Estos parámetros incluyen aspectos de nivel de ruido, interferencias, relación señal/ruido, máximo retardo de propagación, capacidad nominal, caudal efectivo, etc.

2.1.5.1 *El ruido y las interferencias en el canal de retorno*

Existen dos parámetros que influyen negativamente en las portadoras digitales del canal de retorno entre 5 MHz y 45 MHz. Se trata del nivel de ruido y del ruido proveniente de cada local de abonado (*ingress*). Las fuentes de este último son múltiples: señales de telefonía móvil, señales de radio, la red eléctrica del usuario, motores eléctricos etc. Este efecto externo es acumulativo con el nivel de ruido, siendo imposible su eliminación completa. De manera que en el canal ascendente, las señales provenientes de cada usuario junto con el ruido de los elementos existentes (amplificadores, distribuidores, conectores etc.), se van sumando y acaban convergiendo en un único punto en el que se produce un efecto chimenea (*noise funneling*), que aumenta con el número de usuarios y obliga a limitar el tamaño de los nodos ópticos

Para reducir los efectos de ruido existen varias alternativas. Una primera posibilidad es monitorizar el estado del canal, procediendo a cambiar automáticamente de canal si la calidad cae por debajo de un cierto umbral. Otras soluciones son la reducción del ancho de banda del canal o el cambio de esquema de modulación cuando la ocupación del canal ascendente es alta. Estas soluciones conllevan una merma de calidad de servicio (menos capacidad), pero evitan que el usuario experimente interrupciones.

2.1.5.2 *Seguridad en un medio compartido*

En las redes de cable hay que tomar ciertas medidas de seguridad ya que, en principio, cualquier usuario podría escuchar la información transmitida a otro usuario. Para resolver este problema, los sistemas de módems de cable contemplan una serie de mecanismos de seguridad entre los que se incluyen: control de acceso basado en alta previa de la dirección IEEE MAC en la cabecera, cifrado de los datos

con DES y gestión remota basada en el empleo de claves secretas. Los aspectos relativos a seguridad en DOCSIS 3.0 se definen en la especificación SP-SECv3.0.

2.1.5.3 Capacidad nominal y caudal efectivo

La capacidad nominal máxima en el canal de retorno es de 35 Mbit/s en DOCSIS 2.0, aunque en la práctica, sin embargo, el caudal efectivo suele estar en torno a los 3 Mbit/s. Esto es debido a que el caudal efectivo depende de la modulación empleada y de la relación señal/ruido. La capacidad nominal en el canal descendente es de 55,6 Mbit/s (para canales de 8 MHz), con un caudal efectivo de aproximadamente 30 Mbit/s.

Gracias a la introducción de la vinculación de canales en DOCSIS 3.0 este ancho de banda puede multiplicarse. Los operadores piensan en ofrecer canales de hasta 160 Mbit/s en ambos sentidos. Por otro lado, ha de tenerse en cuenta que hay operadores que tienen equipos propietarios que no siguen el estándar DOCSIS.

2.1.6 Adecuación a los servicios considerados

Aunque el origen de las redes HFC son las redes CaTV, sobre las que se ofrecía sólo el servicio de distribución de TV, actualmente las redes HFC soportan todo tipo de servicios multimedia. La implantación de DOCSIS 3.0 mejora considerablemente las prestaciones para ofrecer servicios que requieran mayor QoS. La Tabla 5 muestra un resumen de la adecuación de las redes HFC a los servicios considerados.

Tabla 5. Adecuación de las redes HFC a diferentes servicios

Servicio	Soporte en HFC
Telefonía	Adecuado, varias posibilidades de ofrecerlo
Streaming	Adecuado
Descarga entre pares (Peer to peer)	Adecuado, prestaciones muy buenas para pares en la red
Juegos en red	Adecuado, prestaciones muy buenas para jugadores en la red
Distribución de TV	Adecuado
Vídeo bajo demanda	Adecuado

Servicio de telefonía

Como se vio anteriormente (en el apartado 2.1.2.1) los operadores tienen varias opciones para ofrecer este servicio.

La QoS ofrecida para el servicio telefónico es óptima cuando se utiliza conmutación de circuitos, ya sea con redes superpuestas o integradas. Dado que en el primer caso se utiliza una red independiente a la red HFC esta solución tiene además la ventaja de no ocupar ancho de banda en el canal de retorno, que queda libre para otros servicios.

Ya se ha comentado que la opción de ofrecer la telefonía con VoIP requiere la existencia de mecanismos de QoS que garanticen que los valores de pérdidas, retardos y fluctuación del retardo se mantengan dentro de los niveles adecuados. Al efecto, en DOCSIS se definen los requisitos de QoS a satisfacer para ofrecer este servicio, tratándose como un servicio UGS, por lo que el uso del estándar asegura poder ofrecer el servicio de VoIP con los niveles de calidad requeridos. Los parámetros a configurar para ofrecer este servicio (usando flujos UGS) son:

- Intervalo nominal entre asignaciones
- Tamaño de asignación no solicitada
- Fluctuación del retardo tolerada en la asignación
- Asignaciones por intervalo

El intervalo nominal entre asignaciones se debe elegir igual al intervalo entre paquetes de la aplicación CBR (*Constant Bit Rate*). Por ejemplo si la aplicación de VoIP transmite paquetes cada 10 ms, este será el intervalo nominal entre asignaciones. El tamaño asignado será el necesario para satisfacer los requisitos de ancho de banda de la aplicación y está relacionado con el tamaño de los paquetes.

También sería posible utilizar UGS-AD en caso de usar supresión de silencios, para disminuir el uso de ancho de banda.

En este caso el operador garantiza la QoS dentro de su red HFC, lo que significa que existen distintas posibilidades. Si los dos extremos de la conexión utilizan VoIP y pertenecen a la red HFC, o si uno de ellos pertenece a la RTB, la QoS está garantizada por el operador. Si uno de los interlocutores utiliza VoIP pero no pertenece a la red HFC, la QoS en el tramo externo a la red HFC puede verse comprometida si no se utilizan los mecanismos apropiados, por lo que el operador no podría garantizar la QoS.

Servicios de acceso a Internet y datos.

Las redes HFC son adecuadas para ofrecer acceso a Internet y en general proveer servicios de datos. Como ya se ha visto, la escalabilidad de la red está asegurada, pues el proveedor puede decidir la capacidad ofrecida al usuario y adaptarla al crecimiento esperado de las aplicaciones punto a punto y multimedia. Las limitaciones en el canal de retorno cada vez son menores si se utilizan las nuevas versiones de DOCSIS que proporcionan anchos de banda mayores, gracias al uso de modulaciones más eficientes y técnicas como la vinculación de canales. Actualmente los proveedores suelen considerar el límite en 100 Mbit/s, e incluso en 160 Mbit/s, en ambos sentidos, aunque si observamos las actuales ofertas comerciales a abonados residenciales los paquetes suelen ofrecer un máximo de 3 Mbit/s en el enlace ascendente. En definitiva puede considerarse una solución comparable con otras alternativas, e incluso a veces, si el operador decide usar todos los recursos que el estándar pone a su disposición, más ventajosa. No en vano, en EE.UU., las redes de cable constituyen la tecnología de acceso a Internet a Alta Velocidad con mayor número de usuarios. La posibilidad de combinar el acceso a Internet con la

transmisión de vídeo digital en aplicaciones ligadas al contenido de la TV digital le confiere un potencial adicional.

Servicios interactivos: teletexto interactivo, telecompra, y otros que requieren bajos retardos de tránsito y tiempos de respuesta pequeños entre los usuarios de la red. Como ya se ha visto, el tiempo de ida y vuelta en las redes HFC es inferior a 1,6 ms por lo que son adecuadas para ofrecer esta interactividad. En cuanto a los tiempos de respuesta, resulta factible mantenerlos dentro de los márgenes requeridos por este tipo de aplicaciones.

Juegos en red: para el caso particular de juegos en red es crítico obtener un retardo de tránsito bajo, de manera que la interacción entre los jugadores no se vea degradada por la mediación de la red. Los retardos de las redes HFC se mantienen dentro de límites adecuados. Dado que la tasa de datos en estos servicios es variable, el uso de flujos de servicio de tipo rtPS puede ser adecuado, ya que ofrece tiempo real pero optimizando el uso de la red para tasas de datos variables.

Servicios p2p (peer to peer): los principales requisitos de estos servicios son un alto ancho de banda y escalabilidad. Las redes de cable ofrecen este ancho de banda y favorecen la escalabilidad. Para soportar la diversidad emergente de aplicaciones p2p las redes de cable facilitan a las aplicaciones:

- Capacidad de alcanzar cualquier nodo conectado a la red de forma fiable.
- Capacidad para descubrir un nuevo recurso en la red.
- Comportamiento adaptativo para compensar la naturaleza altamente variable de los nodos p2p.
- Aumentar la disponibilidad y calidad de ficheros a través de la red.
- Reducir el tiempo de adquisición de ficheros.
- Aumentar el número de pares en la red.

Videoconferencia: los principales requisitos de calidad para vídeo interactivo son:

- Bajas pérdidas, menores que el 1%.
- Retardo menor que 150 ms.
- Fluctuación del retardo inferior a 30 ms.

Básicamente la videoconferencia sobre IP (IP/VC) tiene los mismos requisitos de pérdida, retardos y fluctuación del retardo que el servicio de VoIP; sin embargo los patrones de tráfico son radicalmente distintos, principalmente porque en videoconferencia las tasas de paquetes y el tamaño de los mismos son parámetros muy variables. Por eso este servicio se soporta mejor sobre flujos rtPS que permiten tasas variables asegurando el tiempo real. Para especificar la QoS se tendrán que configurar, entre otros, los siguientes parámetros:

- Intervalo nominal de sondeo
- Fluctuación del retardo tolerada para el sondeo

Streaming de vídeo: los principales requisitos de calidad para este servicio son:

- Las pérdidas no deben superar el 5%
- El retardo no debe ser mayor que 4 ó 5 segundos (según la capacidad de almacenamiento temporal de la aplicación de vídeo). Por tanto no es un requisito muy severo.
- Los requisitos de ancho de banda garantizado dependen del formato de codificación y la tasa del flujo de vídeo.

Dado que puede ser tanto *unicast* como *multicast*, la provisión de QoS para tráfico *multicast* que incluye DOCSIS 3.0 puede resultar muy útil para ofrecer este servicio.

Servicios Audiovisuales

Distribución de TV: las redes HFC no sólo son adecuadas para este tipo de servicios, sino que además es la aplicación “estrella”. Ello se debe tanto al ancho de banda disponible como a la posibilidad de interactividad usando el canal de retorno.

El número de canales de TV que se pueden ofrecer evidentemente depende del ancho de banda que se destine a este servicio y, en caso de la TV digital, de la codificación que se esté utilizando. Por ejemplo, para el vídeo esta capacidad puede variar desde los 1,5 Mbit/s de VHS a los 16 Mbit/s del formato 4:2:2. La codificación PAL proporciona canales de entre 4 y 8 Mbit/s. Para el audio en calidad CD se necesitan 1,536 Mbit/s que se reducen a 200 kbit/s en el sistema Musicam, típicamente utilizado en MPEG. Por tanto, el número de canales ofrecidos es muy variable y configurable por el operador. Actualmente, los operadores llegan a ofrecer más de 100 canales de TV.

Como ya se presentó anteriormente (en el apartado 2.1.2.4.2) existen diversas técnicas para ofrecer TV interactiva, que van desde el desarrollo de aplicaciones locales al *set-top box* hasta la incorporación de funciones de CM en el mismo, lo que permite tratar el servicio de TV interactiva como uno más de los soportados sobre IP/DOCSIS, ofreciendo la QoS específica para cada prestación de usuario.

También se puede contemplar la posibilidad de utilizar vídeo sobre IP utilizando DOCSIS, y el canal de retorno para la interacción con este canal. Las facilidades para gestión de QoS de tráfico *multicast* que incluye la versión DOCSIS 3.0 son fundamentales para ofrecer este servicio.

El servicio de Vídeo Digital Bajo Demanda puro para muchos abonados requiere sistemas en cabecera complejos y de gran capacidad. El uso de vídeo sobre IP puede facilitar el desarrollo de este servicio. Por otro lado dentro del consorcio CableLabs, ver apartado de normalización, aparece VOD Metadata que permite el desarrollo de especificaciones para Vídeo bajo Demanda.

Algunas consideraciones finales

Aunque el proveedor de servicios puede asegurar los requisitos de QoS dentro de su red, en el caso de que uno de los extremos finales perteneciera a otra red los parámetros de calidad podrían verse afectados por factores no controlables por el operador. Por ello la provisión de servicios que no necesiten de una red externa, por

ejemplo llamadas de VoIP, videoconferencias, aplicaciones p2p, juegos en red o VPN entre pares que se encuentren dentro de la misma red son las que más pueden beneficiarse de las altas prestaciones de las redes HFC. Sobre estos servicios el proveedor de servicios multimedia puede ofrecer a sus clientes servicios avanzados tan especializados como desee, incluso aunque tengan requisitos exigentes de QoS. Ejemplos de estos servicios avanzados podrían ser: control de seguridad y alarmas, teleasistencia en el hogar para personas discapacitadas o ancianos, plataformas de soporte al teletrabajo, etc.

Para facilitar la provisión de este tipo de servicios surge el proyecto PacketCable, ver apartado de normalización, que especifica un conjunto de protocolos desarrollados para proporcionar al usuario servicios de comunicaciones con QoS enriquecida utilizando tecnología de conmutación de paquetes sobre redes de cable. Está basada en DOCSIS, RSVP y servicios integrados. Inicialmente se pensó en el servicio de voz y vídeo, pero la visión a largo plazo del proyecto es soportar un amplio número de servicios multimedia. En general las aplicaciones multimedia interactivas necesitan de estas prestaciones de QoS enriquecida, requiriendo la asignación de recursos de red. El objetivo de la especificación de calidad de servicio dinámica es precisamente definir una arquitectura para ofrecer QoS en una red de cable.

2.1.7 Aspectos regulatorios

Las redes de cable están sujetas a lo establecido en la Ley 32/2003, de 3 de noviembre, General de Telecomunicaciones, que deroga la 42/1995, de 22 de diciembre, de las Telecomunicaciones por Cable. En particular se indica que para la prestación de los servicios de difusión por cable en un ámbito territorial superior al de una comunidad autónoma será preceptiva la previa obtención de una autorización administrativa estatal y su inscripción en el registro que a tal efecto se llevará en la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones.

Los operadores cuyo ámbito territorial de actuación no exceda del correspondiente al de una comunidad autónoma deberán solicitar la autorización al órgano competente de la misma. Dichas autorizaciones se inscribirán en los registros establecidos al efecto por cada comunidad autónoma. Tales inscripciones deberán comunicarse al registro de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones a efectos meramente informativos.

En lo que se refiere al mapa de operadores de cable en España, se ha producido un fenómeno de concentración, de tal manera que las 13 empresas adjudicatarias originales se han reducido a cuatro. Telecable presta servicio en Asturias, R en Galicia, Euskaltel en el País Vasco y ONO en el resto del territorio.

2.1.8 Escalabilidad

La topología de las redes HFC permite la ampliación progresiva del sistema en función de la demanda de utilización del canal de retorno. La solución consiste en ir reduciendo el número de abonados que comparten el canal de retorno a medida que

crece el tráfico. Así, por ejemplo, se puede partir de una situación inicial con 200 usuarios por rama de cable coaxial. En caso de que aumente el volumen de tráfico en el canal de retorno, esta cantidad puede reducirse a 100 usuarios.

Para efectuar esta reducción, es necesario ir aproximando cada vez más la fibra óptica hacia los usuarios, con lo que el tamaño del nodo óptico se reduce y, por tanto, el número de abonados que comparten el canal de retorno. Esto es posible gracias a que en el despliegue de las ramas troncales se suelen emplear cables con múltiples fibras (cables de 48 ó 96 fibras), utilizándose inicialmente tan sólo dos (una para cada sentido). En caso de requerir ampliar la capacidad del sistema o proporcionar accesos de abonado dedicados, la solución consiste en hacer uso de las fibras sobrantes. Alternativamente, cabe la posibilidad de incrementar la capacidad de las fibras mediante el empleo de DWDM, que permite la utilización de varias longitudes de onda (hasta varios centenares) sobre una fibra. Con esta filosofía se consigue un sistema escalable en número de usuarios. En la Figura 15 se ilustra la aplicación práctica de los conceptos que se acaban de describir.

Otra posible medida para aumentar el ancho de banda disponible para cada usuario sería llevar la fibra óptica hasta el hogar, a medida que la demanda de nuevos servicios multimedia así lo requiera. Actualmente, sin embargo, se trata de una solución poco factible, al menos para usuarios residenciales, por motivos económicos.

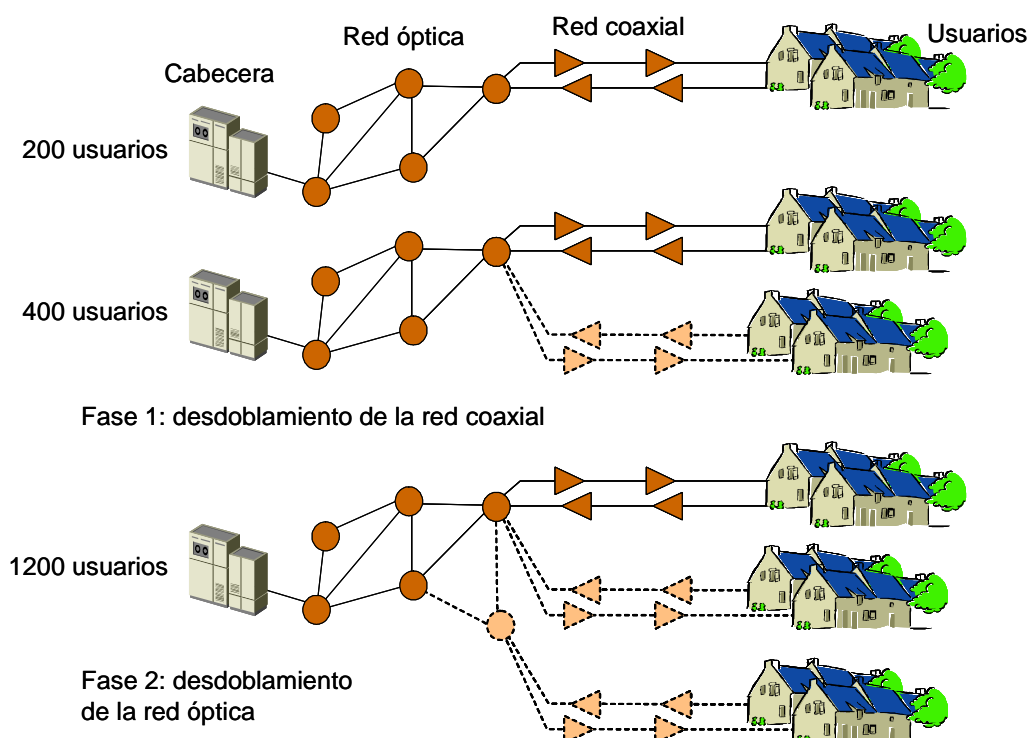


Figura 15. Escalabilidad de una red HFC

Por otro lado DOCSIS 3.0 aporta una gran versatilidad a la hora de ofrecer ancho de banda, en ambos sentidos, al usuario. La capacidad puede ser adaptada a las necesidades concretas de cada uno gracias a la gran variedad de modulaciones y anchos de canal disponibles y al uso de la vinculación de canales.

2.1.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Las redes HFC, y en general las redes de cable, al ser instalaciones subterráneas no causan ningún impacto medioambiental, ni ningún tipo de radiación o emisión hacia el exterior. Por la misma razón, los cambios meteorológicos no influyen en las redes HFC. Los equipos del usuario final, al estar en el interior de los edificios, tampoco se ven afectados por las condiciones medioambientales. Algunos equipos de amplificación y distribución de las señales están a la intemperie, por lo que deben estar debidamente acondicionados.

2.2 Bucle digital de abonado (xDSL)

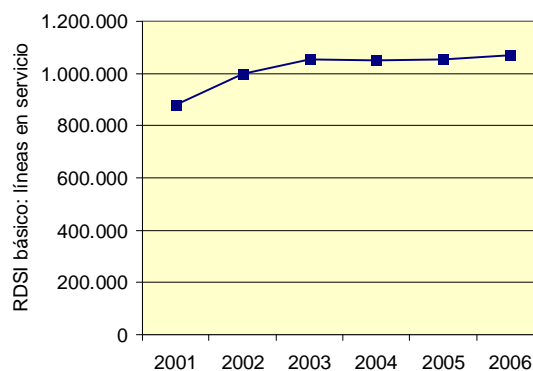
2.2.1 Motivación original y evolución

Bajo las siglas xDSL (*x-Digital Subscriber Line*) se agrupan un conjunto de tecnologías que, utilizando códigos de línea y técnicas de modulación adecuados, permiten transmitir regímenes de datos de alta velocidad sobre el par trenzado telefónico.

Las tecnologías DSL que tienen despliegues comerciales son:

- Acceso Básico RDSI (Red Digital de Servicios Integrados). Aunque no se trata de una tecnología de banda ancha, supuso el primer despliegue significativo de un transporte de información digital sobre el bucle de abonado. Desarrollado a principio de los 80 como tecnología de acceso para líneas de abonado del servicio RDSI. Su objetivo es usar los pares de cobre del servicio telefónico para proporcionar dos canales de 64 kbit/s (canales B), que pueden ser utilizados para voz y datos en modo circuito o paquete, más un canal de 16 kbit/s (canal D) para señalización o datos en modo paquete. El caudal agregado total es por tanto de 144 kbit/s, al que hay que añadir una tara de 16 kbit/s adicional para funciones de mantenimiento, resultando en un régimen binario total de 160 kbit/s.

En la Figura 16 se muestra la evolución de accesos básicos RDSI en servicio desde 2001 hasta 2006 en España³ según datos de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) [11]. Claramente se puede apreciar un estancamiento en el despliegue de este tipo de acceso que está siendo sustituido por ADSL.



Fuente: CMT

Figura 16. Evolución del servicio RDSI acceso básico

³ En el informe anual de la CMT del 2007 no se informa de forma separada del número de accesos RDSI ni básicos ni primarios

En cuanto a los accesos primarios RDSI, con una capacidad de 30 canales B y un canal D, todos ellos de 64 kbit/s, no se consideran como una tecnología de acceso en sí misma ya que van transportados sobre otras tecnologías xDSL que consideraremos a continuación.

En conclusión podemos afirmar que la tecnología DSL utilizada en los accesos RDSI básicos no ha sufrido evolución en las últimas dos décadas y que su despliegue se encuentra paralizado.

- **HDSL (*High Speed Digital Subscriber Line*):** Proporciona enlaces primarios E1 a 2 Mbit/s, o bien T1 a 1,5 Mbit/s en países que siguen normativa del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI), sobre uno o varios pares telefónicos convencionales evitando el empleo de repetidores, aunque existe la posibilidad de utilizarlos para aumentar el alcance. Su objetivo principal es proporcionar acceso simétrico a usuarios de negocio (centralitas, canales de datos), o como infraestructura de operadores en entornos urbanos (conexión de estaciones base a su controlador). Existen diversas variantes de esta tecnología, que difieren en cuanto a códigos de línea, velocidades de transmisión, distancias máximas alcanzables, así como el número de pares requeridos, el cual puede variar entre uno y tres. La tecnología HDSL ha sido sustituida en el presente por los sistemas HDSL-2 en regiones ANSI y por el sistema SDSL-ETSI en regiones que siguen los estándares del Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI). Ambos sistemas reciben la denominación común SHDSL en la normativa del sector de normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T).
- **SHDSL (*Single Line High Speed Digital Subscriber Line*):** Esta tecnología requiere un solo par y tiene mayor alcance que los sistemas HDSL mono-par. Su ámbito de aplicación es el mismo que el HDSL al que sustituye en la actualidad. Una de sus principales ventajas es su compatibilidad espectral con otros sistemas DSL, particularmente ADSL, con los que pueden coexistir en el mismo mazo de pares. Además, la industria ha seguido la normativa sobre su implementación, con lo que los equipos de abonado y central pueden ser de distintos suministradores. El SHDSL está diseñado para el transporte de datos de forma simétrica, a regímenes que se adaptan a las características del canal y que van desde 192 kbit/s hasta 5,6 Mbit/s. La descripción de esta tecnología y su evolución se trata en el apartado 2.2.1.1.
- **ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*):** esta es la tecnología DSL más desplegada en la actualidad en sus distintas variantes: ADSL, ADSL2, ADSL2+, READSL (*Reach Extended*). De los 367,7 millones de usuarios en el mundo de banda ancha que se estiman al final del primer trimestre de 2008, el 65%, es decir, 238 millones son DSL [12], y la tecnología dominante es ADSL (HDSL y SHDSL son aplicaciones de negocio con un volumen de despliegue un orden de magnitud inferiores al ADSL). Actualmente ADSL es la tecnología más extendida tanto a nivel mundial como en España, con un crecimiento que se puede calificar de espectacular en los últimos cinco

años, y que ha sufrido una evolución muy importante en la tecnología de transporte físico, de ADSL a ADSL2+, en su arquitectura de red de acceso, de ATM a Ethernet, y muy significativamente en su aplicación, desde el acceso a Internet a moderada velocidad, hasta el soporte de *triple play* con distribución de TV, vídeo a la carta y un aumento significativo de la velocidad de acceso a Internet. Utilizando la terminología de la matriz de análisis de productos del Boston Consulting Group, se puede decir que el acceso ADSL está en la transición de “estrella” a “vaca lechera”. La descripción de esta tecnología se desarrolla en el apartado 2.2.1.2.

- VDSL (*Very High Bitrate Digital Subscriber Line*), VDSL2: es una extensión de la tecnología ADSL utilizando mayor ancho de banda, mientras en ADSL2+ el ancho de banda es de 2,2 MHz, mientras que en VDSL2, en su perfil de mayor capacidad, se llega a 30 MHz. El objetivo de esta tecnología es conseguir capacidades de transporte máximas entre 50 y 100 Mbit/s, y su aplicación principal es proporcionar servicios de video, dentro de paquetes *triple play* o *quadruple play*, muy enriquecidos, con varios canales simultáneos de TV de alta definición por usuario. La utilización de mayores anchos de banda en el bucle de abonado se consigue: aumentando la complejidad de la tecnología, reduciendo la longitud del bucle de cobre (lo que implica normalmente llegar con fibra óptica más cerca del usuario) y utilizando distintos niveles de potencia de señal. La combinación de estos parámetros permiten definir distintos perfiles para abordar diversos escenarios de despliegue: desde la central, desde “el bordillo”, desde el edificio, etc. Utilizando nuevamente la terminología de la matriz de análisis de productos del Boston Consulting Group, cabe situar en la actualidad esta tecnología en una transición de “interrogación” a “estrella”. En el apartado 2.2.1.3 se aborda la descripción de esta tecnología y su evolución.

2.2.1.1 SHDSL (*Single Line High Speed Digital Subscriber Line*)

El sistema SHDSL (conocido en mercados ANSI como HDSL2 y en mercados ETSI como SDSL ETSI) requiere un solo par y tiene mayor alcance que los sistemas HDSL mono-par para los que constituye la tecnología de sustitución. Una de sus principales ventajas es su compatibilidad espectral con otros sistemas DSL, particularmente ADSL, con los que pueden coexistir en el mismo mazo de pares. Claramente su dominio de aplicación es el acceso de negocios (PYMES) y como infraestructura de transmisión de acceso para operadores (acceso a estaciones base en entornos urbanos). Se pueden distinguir dos fases que se reflejan en la normativa:

- Sustitución ventajosa del HDSL: que como se indicó anteriormente tiene como características objetivo mayor alcance, mayor compatibilidad electromagnética con otros sistemas, adaptación de velocidad a las condiciones de la línea desde 192 a 2.320 kbit/s, capa de adaptación para transmitir estructuras de canal o carga de celdas ATM. Ciñéndose al entorno ETSI la normativa se recogía en el ETSI TS 101 524-1 y en el Anexo B de la

recomendación G.991.2 del UIT-T de 2001 (el Anexo A reflejaba los requisitos de los mercados ANSI).

- Mejoras en capacidad y ámbito de aplicación que se recogen en la recomendación G.991.2 de la UIT-T de 2003, y que se pueden resumir en:
 - Capas de adaptación a transporte de tramas/paquetes, en coordinación con los trabajos del IEEE 802.3ah *Ethernet in the First Mile* (EFM), que definen a SHDSL como la tecnología de EFM sobre par de cobre, y en general en línea con la tendencia de utilizar Ethernet en las redes de acceso de nueva generación como se verá en la evolución de los nodos y arquitecturas de red de acceso.
 - Mayores capacidades de transporte mediante la utilización de modulación PAM de 32 niveles manteniendo la redundancia de códigos trellis.
 - Mayores capacidades mediante agrupamiento de pares (*bonding*), hasta 4 pares.

En la Tabla 6 se resumen las características físicas de esta tecnología para las configuraciones del mercado ETSI.

Tabla 6. Características SDSL ETSI

G.991.2 (2003)	
Código de línea	16 PAM, 4B1H, 3 bits de información, 1 bit redundante para código Trellis
Velocidades de aplicación	192 – 2.312 kbit/s en incrementos de 8 kHz
Máx. alcance para máx. vel.	3,5 km
G.991.2 (2003) Anexo F ⁴	
Código de línea	32 PAM, 4 bits de información, 1 bit redundante para código Trellis
Velocidades de aplicación	768 – 5.696 kbit/s en incrementos de 8 kHz
Máx. alcance para máx. vel.	2,1 km

⁴ El Anexo F es para la Región 1, es decir, mercado ANSI. Para mercado ETSI, Región 2, corresponde el Anexo 2 que aún no ha sido elaborado. Se toman las cifras significativas del Anexo F ya que se estima que no variarán para el G (de hecho ya se están comercializando productos de esta forma).

2.2.1.2 Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)

A continuación se proporciona un resumen de las motivaciones y evolución de la tecnología ADSL:

- Finales de los 80 principios de los 90:
 - Objetivo principal de los operadores de telefonía: revalorizar su planta de cobre instalada ofreciendo servicios de vídeo: Vídeo bajo Demanda y Distribución de TV (por este orden)
 - Tecnología en boga: ATM. Tecnología básica de la RDSI de banda ancha (RDSI-BA) que en su definición no tiene accesos realmente desplegables de forma masiva (define accesos ópticos a 155, 620 Mbit/s, posteriormente 25 Mbit/s). Proporciona prioridades de tráfico, es decir, mecanismos para soportar calidad de servicio sobre flujos multiplexados de vídeo, audio, voz y datos. Salvo la voz, en aquel momento todos los tráficos eran altamente asimétricos. De aquí los objetivos iniciales de capacidad (8 Mbit/s hacia el abonado y 640 kbit/s en sentido inverso), que hacían posible, en el caso mejor, la transmisión de más de un canal de TV estándar comprimido hacia el usuario.
 - El mantener la telefonía básica es un requisito fundamental, esquema “*data over voice*”⁵.
 - El control de los flujos de vídeo mediante señalización RDSI-BA u otros protocolos de control del transporte ATM hicieron poco realizable el despliegue de servicios de vídeo, amén de las bajas capacidades de transporte que se consiguieron por los primeros despliegues, y la poca familiaridad con la nueva tecnología y el desconocimiento de la planta.
- De 1996 hasta circa 2002
 - Explosión del acceso a Internet (la Web)
 - Octubre de 1996: el Joint Procurement Consortium, formado por las operadoras Ameritech, BellSouth, Pacific Bell y SBC Communications, decidió optar por una solución ADSL basada en transporte ATM, marcando la tendencia definitiva⁶, entre otros motivos por ser la solución disponible de forma inmediata en aquella fecha.
 - Despliegue masivo a nivel mundial de tecnología ADSL, utilizando DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) ATM (básicamente

⁵ No confundir con “*voice band data*” = módems telefónicos clásicos.

⁶ Ya en estas fechas se cuestionaba, entre otros por Bellcore (en la actualidad Telcordia), la utilización de ATM, proponiéndose el transporte directo de tramas Ethernet sobre ADSL.

un banco de módems ADSL y un multiplexor ATM) con aplicación casi exclusiva como acceso a Internet de alta velocidad.

- De 2002 hasta hoy
 - Se retoma el objetivo principal de ofrecer las distintas formas de TV sobre el par de cobre. La evolución tecnológica permite una oferta comercial competitiva:
 - Desarrollo de la televisión IP (IPTV) y evolución de los DSLAM que se transforman de multiplexores ATM a conmutadores Ethernet inteligentes, o *routers* IP (IP-DSLAM).
 - La migración de la multiplexación ATM al enrutamiento IP además ha permitido una implementación del *multicast*, necesario para un servicio de distribución de TV eficiente, de una manera comercial.
 - ADSL2 y ADSL2+ permiten obtener mayores capacidades en el bucle y mayores alcances. Estos dos parámetros son complementarios, de modo que con menor alcance se consigue mayor capacidad. En cualquier caso la mejora tecnológica introducida permite la oferta de dos canales de TV estándar en la mayoría de los bucles de abonado, e incluso llegar a TV de alta definición en bucles cortos.
 - Nuevos sistemas más eficientes de codificación de vídeo. El paso de MPEG2 a MPEG4 supone reducir aproximadamente a la mitad la capacidad necesaria para una misma calidad de vídeo.
 - Compatibilidad hacia atrás de las distintas modulaciones ADSL2, ADSL2+ entre sí y con ADSL, auto-configurándose y permitiendo mantener los módems existentes. Un efecto lateral es que se sigue manteniendo el ATM en el bucle de abonado aunque la nueva operación no lo requiera (la calidad de servicio puede discriminarse por VLAN virtuales).

En la Tabla 7 se presentan las diferentes “familias” ADSL a las recomendaciones de la UIT-T en las que se especifican, la fecha de edición de las mismas y sus capacidades máximas.

A continuación se analizan los factores que afectan y limitan esta técnica de transmisión:

Alcance y tipos de bucle. El objetivo de los sistemas ADSL es llegar a la mayor parte de los abonados dentro del Área de Servicio, zona geográfica servida por una central de conmutación o una Unidad Remota de abonados, en donde se ubica el DSLAM.

Para calcular el alcance desde una central, normalmente se utiliza un cálculo resistivo. Los elementos que alimentan el bucle de abonado se suelen especificar en

ohmios; así se dice del circuito de línea de una central que soporta bucles de 1200 a 1900 ohmios, es decir, la suma de la resistencia del par más el teléfono pueden alcanzar como máximo esos valores. Esta resistencia, junto con la tensión de alimentación que suministra la central y la resistencia interna de este suministro de alimentación (tradicionalmente conocida como el puente de alimentación), nos dan un valor mínimo de corriente en el bucle que permite el funcionamiento del aparato telefónico. Las tensiones de alimentación normalmente utilizadas son -48 y -60 voltios. En España -48 voltios.

Tabla 7. Recomendaciones y capacidades máximas de ADSL

Familia	Rec. UIT-T	Fecha	Capacidades máximas
ADSL	G.992.1	1999	7 Mbit/s bajada 800 kbit/s subida
ADSL2	G.992.3	2002	8 Mbit/s bajada 1 Mbit/s subida
ADSL2plus	G.992.5	2003	24 Mbit/s bajada 1 Mbit/s subida
ADSL2-RE	G.992.3	2003	8 Mbit/s bajada 1 Mbit/s subida

A partir de las estadísticas de los operadores, se estima que un 90% de los abonados en EE.UU. y la mayoría de los abonados en Europa están a una distancia menor de 6 km con pares de 0,5 mm, o de 4,5 km con pares de 0,4 mm. Los valores medios en la Unión Europea se encuentran entre 500-1000 m en escenarios urbanos densos, con área de servicio típicas de 2,5 km en estos escenarios y 3,4 km en escenarios de baja densidad.

Es necesario también tener en cuenta las posibles irregularidades que pueden presentarse en la planta telefónica, como empalmes de distinto calibre y derivaciones sin terminar (*bridge taps*). En España, no obstante, la planta exterior es relativamente nueva debido al espectacular crecimiento del servicio telefónico en las últimas décadas. En 1955 se celebró la instalación del teléfono 1 millón, en 1970 había 4,6 millones, en 1985 el número de líneas era de 9,3 millones y en la actualidad hay más de 16 millones de líneas. Esto implica que la mayor parte de los bucles de abonado utilizan cables de aislamiento plástico, uniones conectorizadas y el diseño de la infraestructura tiende a ser de planta dedicada en lugar de planta multiplada que origina las derivaciones sin terminar.

Ruido de fondo. Estudios realizados por Telcordia durante el proceso de estandarización del ADSL concluyeron que el ruido de fondo, en el caso peor, puede modelarse como un ruido blanco gaussiano aditivo, con un nivel de potencia de -140 dBm/Hz o, de forma equivalente, 30 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ sobre 100 ohmios.

Ruido impulsivo. Son ráfagas de gran amplitud de ruido, con duración variable desde unos pocos hasta unos cientos de microsegundos, procedentes de diversas fuentes: impulsos de disco, corriente de llamada, cambios de polaridad en la línea, rayos, etc.

Interferencias de emisiones de radio. Aunque el par trenzado telefónico es teóricamente un sistema de transmisión equilibrado, este equilibrio decrece con la frecuencia. Además, la planta externa tiene recorridos en el espacio abierto (fachadas, interior de las casas, zonas rurales en postes) que incluso en algunos tramos se realizan con pares paralelos en vez de trenzados. Todo esto hace que estas partes de la planta se conviertan en antenas captadoras de las emisiones de radio, tanto en onda larga, como media o corta, especialmente las emisiones de radioaficionados.

Coexistencia con el servicio telefónico. Además de los efectos de ruido impulsivo mencionados más arriba, una línea telefónica presenta cambios de impedancia dependiendo de si el aparato telefónico está colgado o descolgado.

Diafonía. Es el efecto que más limita la capacidad de los sistemas xDSL. La diafonía es el acoplamiento inductivo y capacitivo entre diferentes hilos dentro del mismo mazo o mazos adyacentes.

Aunque este efecto existe a frecuencias vocales, y de ahí el que los pares del bucle de abonado sean trenzados en la mayor parte de su recorrido, a las altas frecuencias de los sistemas DSL adquiere nueva relevancia (el paso del trenzado para audio no es el idóneo para estas frecuencias).

Existen dos tipos de diafonía: la paradiafonía (NEXT) cuando la fuente de la señal perturbadora está colocada en el mismo extremo que el receptor perturbado; y la telediafonía (FEXT), cuando el receptor está colocado en el lado remoto. En la Figura 17 se ilustran estos conceptos.

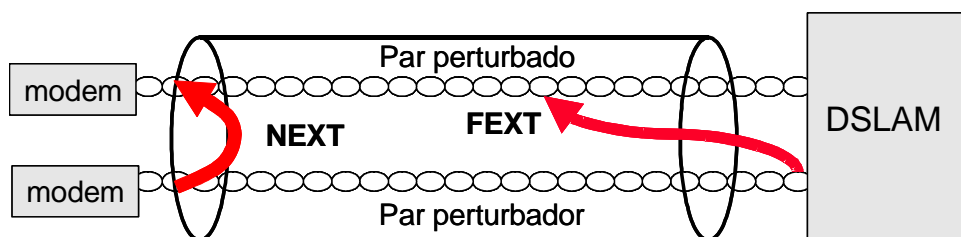


Figura 17. Paradiafonía y Telediafonía

La diafonía además puede ser auto, cuando es producida por sistemas de la misma tecnología, o foránea, cuando son sistemas diferentes. Fácilmente se comprende que el tipo de diafonía más perjudicial es la auto-paradiafonía, causada por el acoplamiento de la señal sin atenuar a la salida de un módem sobre el receptor de otro módem. Para evitar este efecto, en ADSL se suele emplear duplexado por

división en frecuencia, es decir, bandas distintas en cada extremo para recepción y transmisión.

En lo que a prestaciones (velocidad, distancia) se refiere, es la paradiafonía foránea, causada por otros sistemas de transmisión digital, la que mayores limitaciones plantea en la práctica. Los sistemas más perturbadores son las transmisiones de 2 Mbit/s en código HDB3, las interfaces de línea (interfaz U) de RDSI y las líneas HDSL.

Las principales técnicas de modulación propuestas para los sistemas ADSL son CAP (*Carrier-less Amplitude and Phase modulation*) y DMT (*Discrete Multi-Tone*). Tras una controversia inicial, se puede considerar que a los efectos del presente estudio sólo la técnica DMT es utilizada.

DMT, por su parte, trata de aproximarse al máximo teórico de Shannon-Hartley de capacidad de un canal en función de la frecuencia, dividiéndolo en numerosos subcanales. Cada uno de ellos se modula en amplitud y fase, adaptándose la tasa de bit a la capacidad real de dicho subcanal, dada por la relación señal-ruido del mismo. Traducido en términos prácticos, DMT proporciona más alcance para la misma velocidad, o más velocidad para el mismo alcance respecto a los sistemas CAP. Estas ventajas se pagan en más complejidad (más área de silicio), así como en una relación de potencia de pico (todas las portadoras transmitiendo en fase) respecto a potencia media que hace que los márgenes dinámicos sean extremadamente amplios (convertidores A/D de más resolución, dispositivos analógicos con grandes márgenes dinámicos).

En ADSL se emplean 256 subportadoras, mientras que en VDSL son hasta 4.096 para VDSL hasta 17 MHz y 7574 para VDSL hasta 30 MHz. El espaciado entre las portadoras es de 4,3215 kHz, escogido en relación con la duración del símbolo, a fin de reducir las interferencias entre portadoras y entre símbolos.

Una de las ventajas más notables de la tecnología ADSL es su grado de normalización e interoperabilidad, demostrada en el campo. La UIT-T recoge esta normalización en sus recomendaciones G.992.1, para ADSL DMT, y G.992.2, para el denominado ADSL-lite. Esta última variante proporciona menor caudal, pero tiene la ventaja de no requerir divisor (*splitter*) en casa del abonado, lo que, en principio (ver consideración al respecto más adelante), permite evitar el desplazamiento de personal de la operadora a casa del abonado para la instalación del servicio. En mayo de 2002 se acordó una evolución de estas normas, conocidas de forma genérica como ADSL2 (recomendaciones G.992.3 y G.992.4), que introducen una serie de mejoras derivadas de la experiencia obtenida con los despliegues realizados:

- Mejoras en las pruebas de interoperabilidad, así como en señales y mensajes de iniciación.
- Mejoras en prestaciones de alcance/caudal
- Modo de bajo consumo

- Posibilidad de usar todo el espectro para el transporte de la señal digital, desde 0 Hz, en aquellas aplicaciones en que no se requiera servicio telefónico simultáneo (*all digital mode*)
- Posibilidad de usar varios pares simultáneamente: 32 Mbit/s sobre 4 pares, 24 Mbit/s sobre 3 pares, 16 Mbit/s sobre 2 pares (*inverse multiplex bonding*)
- Capa de convergencia para transportar directamente Ethernet sobre ADSL

En la actualidad la tecnología ADSL en fase de despliegue comercial es el ADSL2+, que amplía la banda utilizable hasta 2,2 MHz (el doble que en el ADSL/ADSL2) y consigue capacidades máximas de transferencia de 24 Mbit/s en sentido descendente y 1 Mbit/s en sentido ascendente. Para bucles prácticos en Europa esto significa que se pueden obtener capacidades descendentes con garantía de 8 Mbit/s, lo que permite soportar hasta cuatro canales de TV simultáneos de calidad estándar codificados en H.264 AVC o un canal de alta definición.

ADSL2+ se puede considerar el último paso en la evolución de las técnicas ADSL. Para mayores capacidades, y menores alcances, el siguiente paso son las técnicas VDSL2.

Otra línea de evolución, en sentido contrario al anterior, es la propuesta *Low Frequency DSL* del DSL Forum [13], que utiliza una región del espectro situada por debajo de la banda descendente (red a usuario) de ADSL. Esta nueva banda se usa en los dos sentidos de forma solapada, lo que permite velocidades de unos 180 kbit/s y alcances de hasta 12 km con pares de calibre 0,5.

2.2.1.3 *Very high speed Digital Subscriber Line (VDSL)*

Extendiendo los límites de la tecnología del ADSL es posible utilizar un ancho de banda mayor sobre el par de cobre, hasta alcanzar los 30 MHz. Por supuesto, esto sólo es factible para alcances más reducidos que los vistos en ADSL. Por este motivo, la tecnología VDSL va acompañada de un amplio despliegue de fibra hasta los nodos desde los cuales se alcanza al abonado mediante tiradas de cobre muy cortas. En la Figura 18 se especifican los alcances y velocidades de transferencia máximas VDSL2 y ADSL2+. De dicha figura se puede deducir que el ADSL2+ asegura una tasa de transferencia para el área de servicio de las centrales europeas, donde la mayoría de los usuarios se encuentran a menos de tres kilómetros, suficiente para proporcionar los servicios de *triple play* actualmente ofertados. Si se desea mejorar la oferta, por ejemplo proporcionando varios canales simultáneos en alta definición, se hace necesario conectar los usuarios preferiblemente con VDSL2 desde los repartidores de planta exterior o desde los habitáculos de las Infraestructuras Comunes de Telecomunicación de los Edificios.

En VDSL2 se usan las mismas frecuencias y el mismo espaciado que en ADSL, lo que permite que un módem VDSL pueda comunicarse con un módem ADSL (a velocidades ADSL). Además, el VDSL, al igual que el ADSL, permite la coexistencia del servicio telefónico en el par.

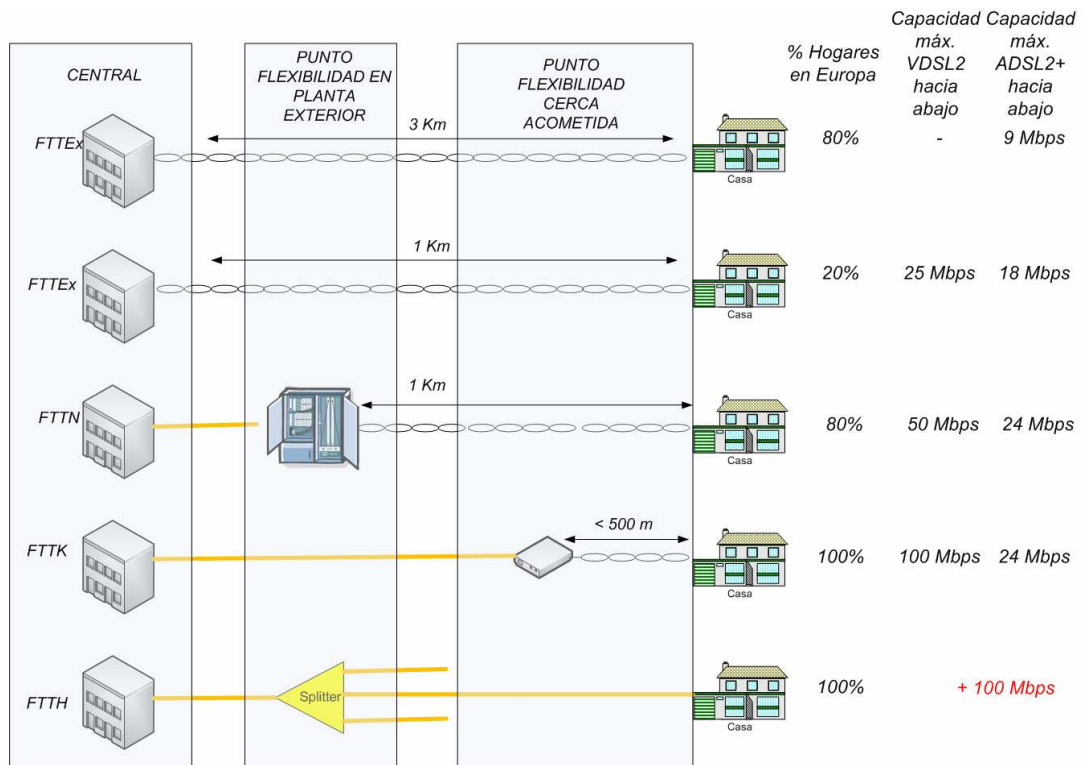


Figura 18. Alcances y tasas de transferencia

En la Figura 19 [14] se ilustra que esta compatibilidad no es sólo funcional, sino que puede serlo también de coberturas.

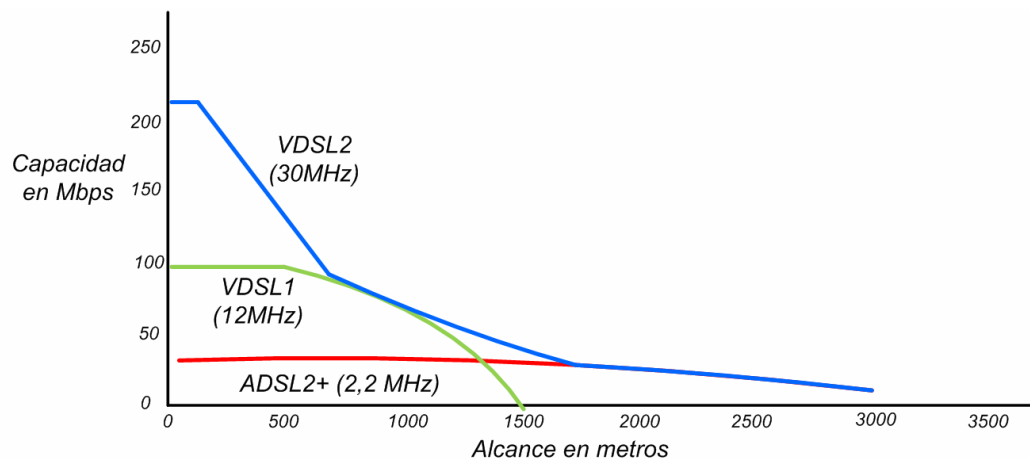


Figura 19. Tasa de transferencia descendente vs. distancia VDSL vs. ADSL

De este modo el VDSL2 puede contemplarse como alternativa para la sustitución total del ADSL2plus en todos los escenarios de despliegue. Aunque eventualmente esto podría llegar a ocurrir, y es una tendencia a observar en el futuro próximo, hacemos notar que la Figura 19 se refiere al perfil de VDSL2 de 30 MHz, en la

actualidad sólo utilizado en la región APAC (Asia-Pacífico), en Europa se utilizan perfiles de hasta 17 MHz (en la Figura 20 se muestran los perfiles estandarizados de VDSL2 [15]). Aunque la densidad de puertos por placa es la misma para ADSL2plus que para VDSL2 la complejidad computacional medida por el producto ancho de banda x tasa de bits es prácticamente dos órdenes de magnitud superior, lo cual en principio, y a la espera de que los volúmenes de producción reduzcan los precios del VDSL2, significa una clara ventaja en costes a favor del ADSL2+.

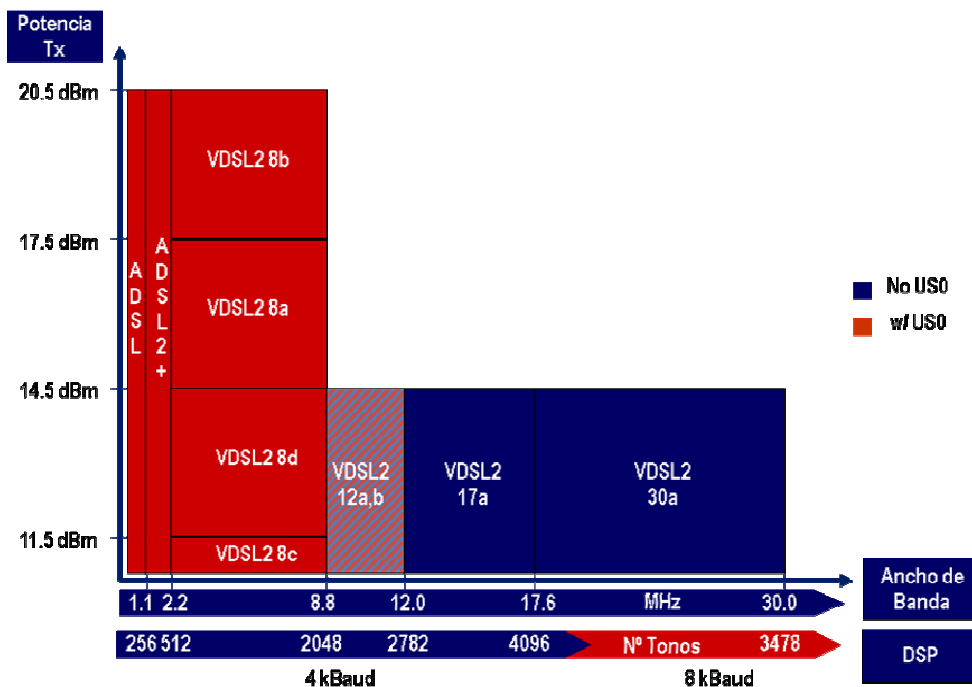


Figura 20. Perfiles de VDSL2

Otro aspecto a considerar es el tratamiento de la diafonía en VDSL2. Al ser sus aplicaciones más frecuentes en bucles cortos, la telediafonía comienza a ser significativa por llegar menos atenuada a los receptores. Por ello los esfuerzos de investigación se centran en arbitrar medios para combatir la diafonía, que como ya se mencionó, es el factor limitativo más importante en las técnicas DSL. Las técnicas utilizadas son [16] [17] [18]:

- *Dynamic Spectrum Management (DSM)*: Básicamente consiste en contemplar el mazo de 25 ó 50 pares como un medio electromagnético compartido, y asignar la potencia y número de bits a modular por tono de una forma coordinada y óptima para todos los pares del mazo. Esta técnica requiere asignar una capacidad de proceso por mazo de pares, que normalmente se ubica en la placa de líneas, que suele tener del orden de 50 (48) puertos. Desde el punto de vista de ingeniería de aplicación requiere una asignación "rígida" mazo a placa.
- *Dynamic Line Management (DLM)*: Se puede considerar una extensión del DSM (implica su existencia) para cubrir también la interferencia inter-mazos

y requiere procesamiento de señal a niveles superiores y con tiempos de reacción de horas o días.

- *Upstream Power Back-off (UPBO)*: Ajuste (reducción) de la potencia transmitida por el módem de usuario para no interferir con pares en el mismo mazo que tengan longitudes superiores al par perturbador. Por ejemplo, el caso de un par alimentado desde la central y otro desde un nodo remoto. Este tipo de situaciones pueden ocurrir por ejemplo en escenarios de desagregación de bucle donde los pares perturbado y perturbador pertenecen a operadores diferentes.

2.2.2 Estructura y elementos de red

2.2.2.1 Sistemas de HDSL y SHDSL (TDM)

Estos sistemas se utilizan principalmente como meras soluciones de transporte para proporcionar accesos de 2 Mbit/s. La configuración más típica se muestra en la Figura 21. El sistema consta de un módem o terminal de red en las dependencias del usuario y de un equipo que agrupa los correspondientes módems o terminales de línea en la central. Ambos módems ofrecen interfaces G.703 de 2 Mbit/s, o de $n \times 64$ kbit/s, tanto del lado de usuario, como del de red.

Las interfaces G.703 del lado de red se llevan normalmente a un repartidor digital, donde se conectan para entregar la señal a la red destino. A modo de ejemplo, en la Figura 21 se muestra una conexión a un conmutador telefónico de la señal procedente de una centralita digital; y otra conexión a la planta de transmisión para prolongar circuitos alquilados. Como se indicó anteriormente, una aplicación muy común de estos sistemas es la interconexión de estaciones base de sistemas celulares en áreas urbanas.

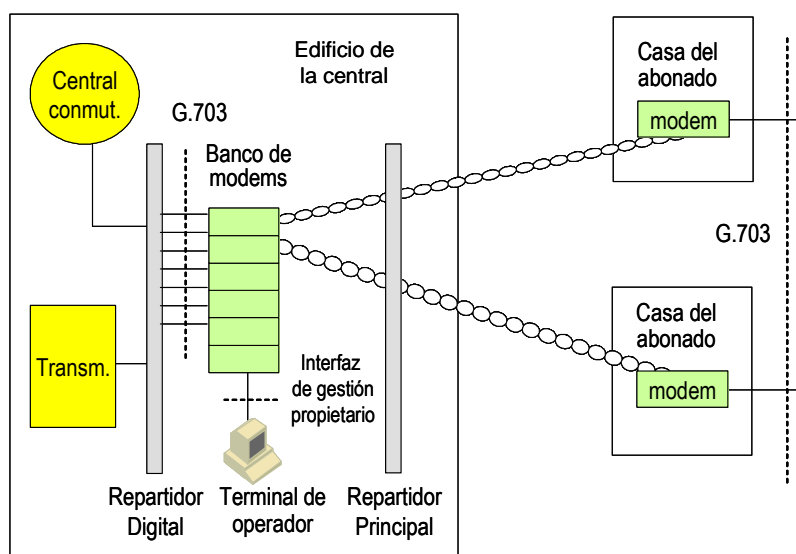


Figura 21. Configuración HDSL en "banco de módems"

La gestión de este tipo de sistemas suele ser autónoma, esto es, sin formar parte de una red propiamente dicha. Para ello, suelen ofrecer una conexión en el banco de módem de central mediante una interfaz de gestión propietaria. Esto no impide que la gestión se pueda hacer de manera remota (por ejemplo, vía módem), e incluso centralizar la gestión de varios sistemas sobre un único terminal, sin que en ningún caso aparece la idea de una “red”.

En la Figura 22 se muestra una configuración en la que el equipo de central integra el sistema de transmisión SDH, proporcionándose una interfaz de gestión normalizada para su integración en un sistema de gestión extremo a extremo. La transmisión de línea SHDSL, con una carga útil de 36 canales de 64 kbit/s (2,3 Mbit/s), permite transportar hasta los módems un contenedor virtual VC-12 SDH, en vez de los 2 Mbit/s; esto hace que se pueda realizar una monitorización más estricta de la calidad del servicio hasta el mismo extremo del abonado.

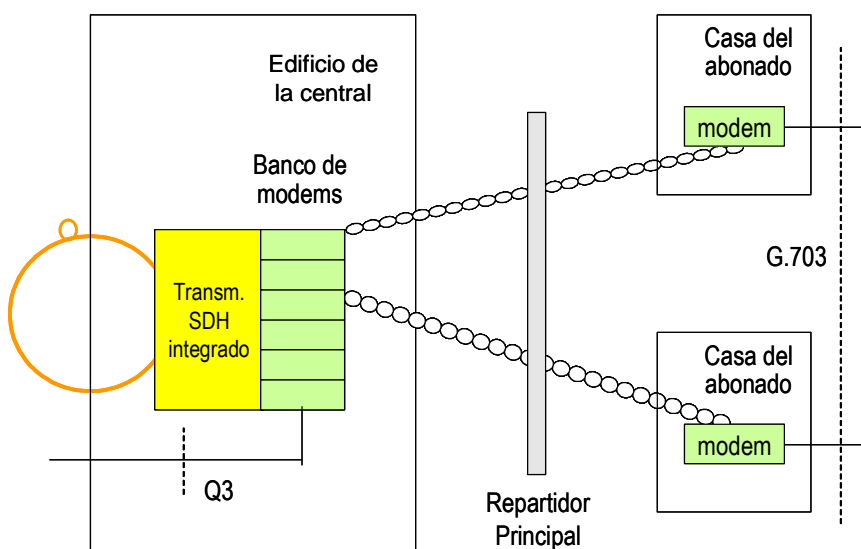


Figura 22. Configuración HDSL con transmisión SDH integrada

2.2.2.2 Sistemas de ADSL y SHDSL (ATM)

La utilización del DSLAM ATM se puede considerar una tecnología obsoleta y en fase de sustitución, aunque existe una considerable cantidad de planta instalada. La Figura 23 muestra una configuración típica de la instalación en central.

El equipo de central incorpora funciones de multiplexación ATM. En la actualidad este tipo de equipos se limitan a ofrecer acceso a Internet de Alta Velocidad, permite obtener ganancia estadística mediante “sobre suscripción”, es decir, la suma de los tráficos “medios” ofrecidos a los abonados es superior al tráfico total que puede suministrar la red. En la Figura 23 se muestra una lista de las interfaces hacia la red más comunes en ADSL. Generalmente se trata de interfaces ATM sobre SDH y las velocidades más habituales son un VC3 34 Mbit/s ó 155 Mbit/s.

Cuando los sistemas son muy pequeños, se opta por interfaces IMA (*Inverse Multiplex ATM*) sobre $n \times E1$ (con un valor n máximo de 8). Esta opción puede parecer muy atractiva si se comparan los costes de unos pocos enlaces primarios frente al de enlaces a 34 Mbit/s ó 155 Mbit/s. Sin embargo, han de tenerse en cuenta también los costes de las terminaciones en los conmutadores de la red ATM. En este sentido, hay que considerar tanto los costes directos (no hay mucha diferencia en una terminación de línea de 2 Mbit/s a una de 155 Mbit/s), como los de oportunidad (si se utilizan terminaciones de 2 Mbit/s, ocupando ranuras de circuitos de terminación en el conmutador, se desperdicia la capacidad de conmutación de la matriz ATM).

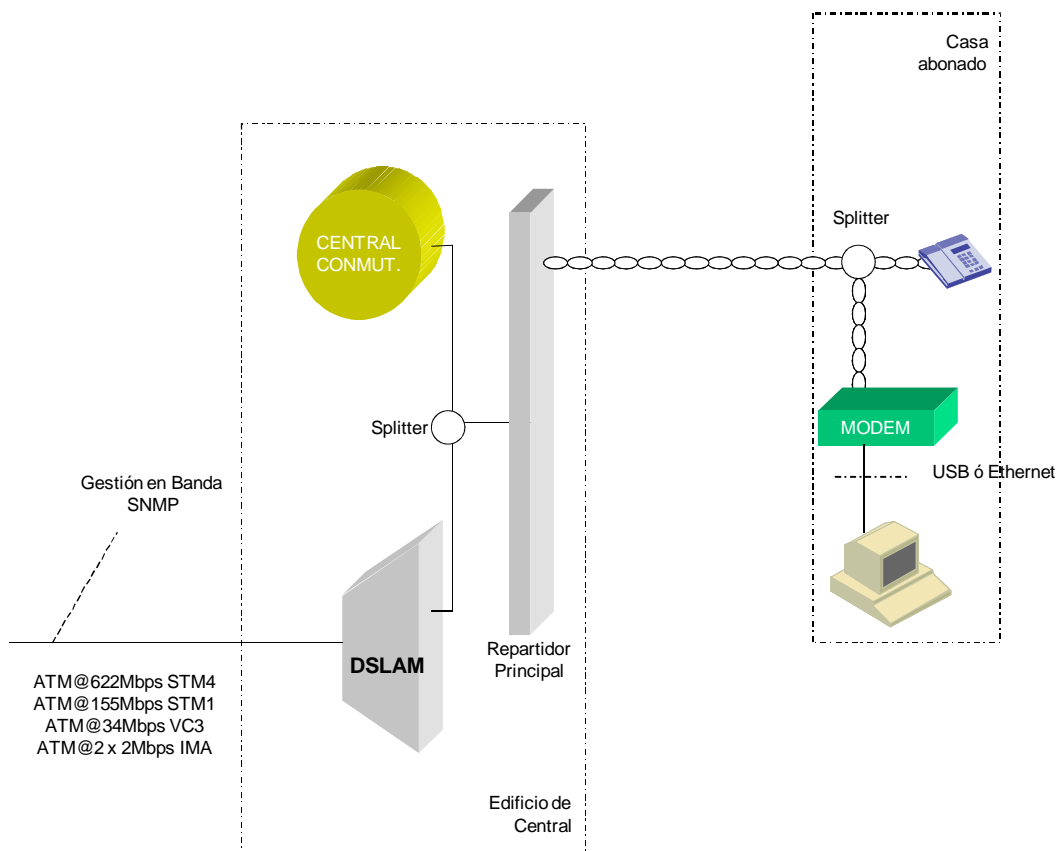


Figura 23. Acceso ADSL

La orientación hacia el mundo de los datos hace que estos sistemas hayan optado por un protocolo de gestión SNMP (*Simple Network Management Protocol*) que normalmente es transportado sobre ATM, aunque a veces está disponible sobre una conexión Ethernet separada.

En la Figura 24 se muestra un escenario de red típico para la provisión del servicio de Acceso a Internet de Alta Velocidad mediante ADSL.

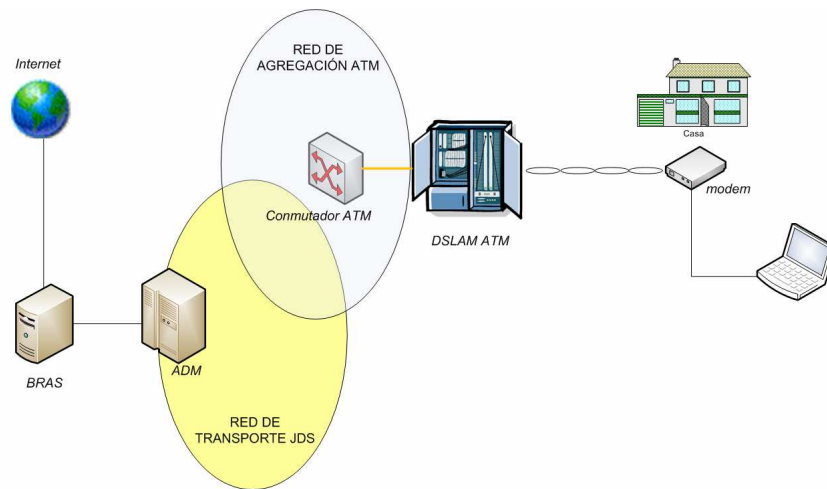


Figura 24. Modelo de referencia de acceso a Internet vía ADSL

2.2.2.3 Sistemas de ADSL, VDSL y SHDSL (Ethernet-IP)

La Figura 25 tomada de [19] sintetiza perfectamente la evolución que han seguido las funciones y estructura de la red de los sistemas de acceso A/VDSL desde el ATM para Acceso a Internet de Alta Velocidad hasta el *Triple Play*.

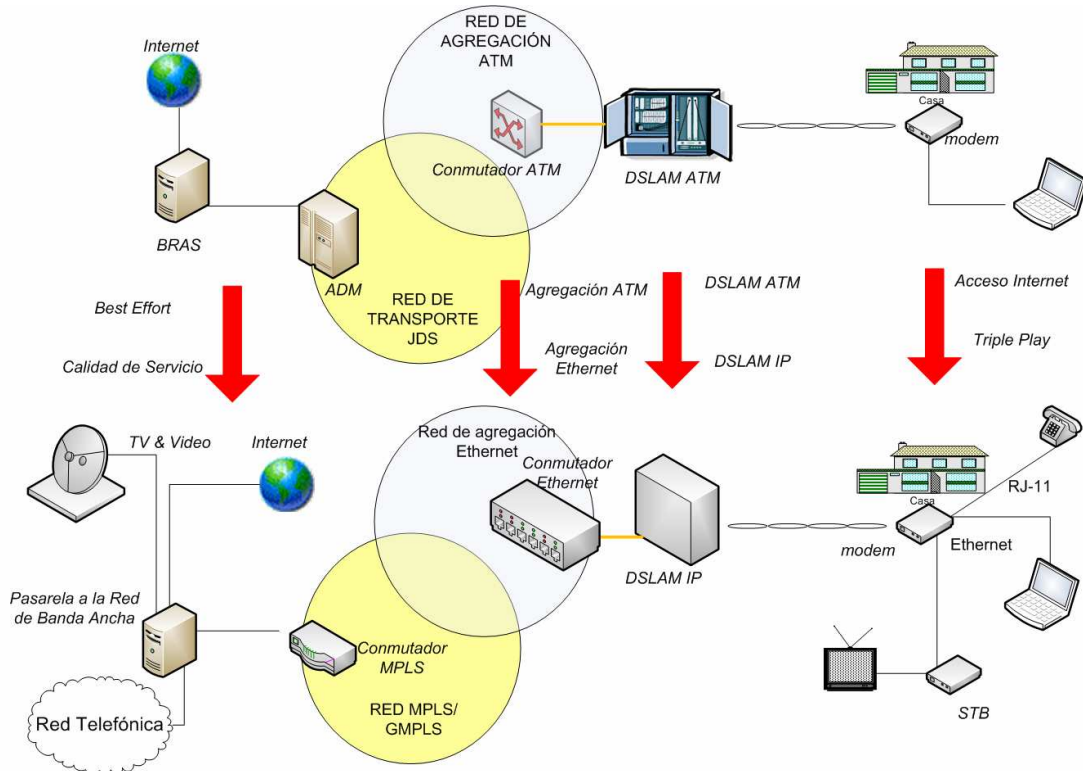
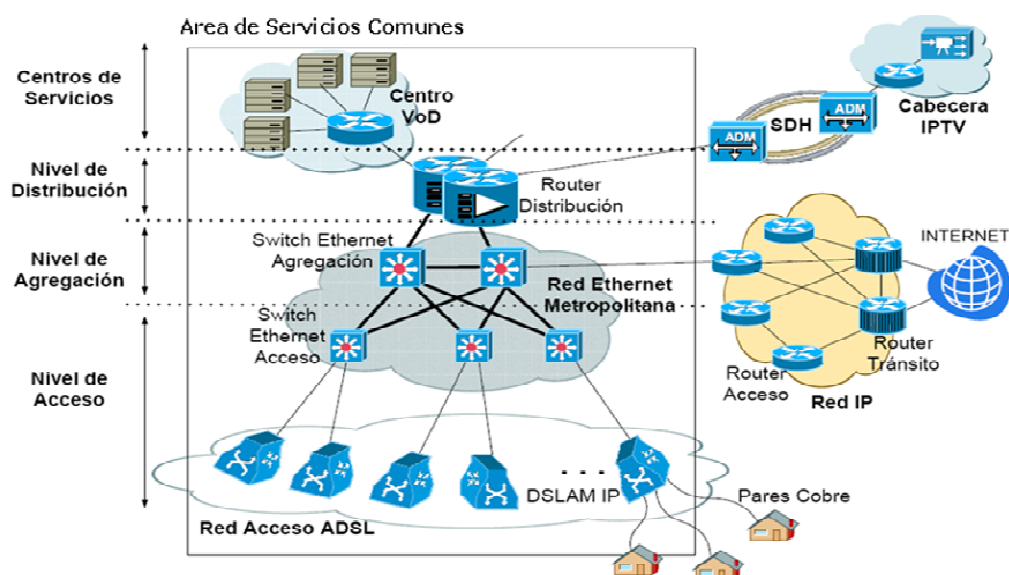


Figura 25. Evolución de Acceso a Internet a *Triple Play*

Los rasgos de esta evolución son:

- IP/Ethernet se convierte en el mecanismo de transporte nativo del acceso, aunque normalmente se sigue manteniendo la capa ATM en el último tramo de cobre.
- El DSLAM evoluciona a un IP-DSLAM, es decir pasa de ser un multiplexor ATM a incorporar funciones de conmutador Ethernet, *router* IP, con funciones de *multicast* IP, IGMP *snooping* para control rápido del cambio de canal.
- Se abandona el empleo de conmutadores ATM en la red de agregación de tráfico de acceso, reemplazándose por conmutadores Ethernet, MPLS o VPLS.
- Los DSLAM se convierten en nodos que, además de accesos DSL, también soportan accesos de fibra.
- Los DSLAM ofrecen interfaces Gigabit Ethernet hacia la red y proporcionan mucho mayor ancho de banda, ya que los servicios de vídeo no permiten grandes ganancias por multiplexión estadística.
- Empiezan a adquirir importancia las configuraciones pequeñas de DSLAM, requeridas en los despliegues de VDSL2 que garanticen anchos de banda para vídeo de Alta Definición (~25 MHz). Estas configuraciones, aunque continúan siendo más caras que las de central han experimentado un descenso apreciable en sus precios.
- Adicionalmente el soporte de los servicios de vídeo requiere funciones adicionales en la red. Ya se ha mencionado que los DSLAM deben soportar *multicast*, de forma que la distribución de TV tiendan a ocupar un canal por programa en la red, en vez de un canal por usuario. Un problema común a todos los sistemas de vídeo codificado es el tiempo de cambio de canal o zapeo (*zapping*). La UIT-T recomienda que para alcanzar un *Mean Opinion Score* (MOS) de 3,5 este tiempo debe mantenerse por debajo de 0,43 segundos. La red para el servicio IPTV incorpora dos mecanismos: el IGMP *Immediate Leave* que permite detectar y conectar al árbol de distribución en el punto más cercano al usuario (placa de línea, *router* DSLAM, nodos de la red de agregación) y servidores de *unicast* temporales, que sirven el flujo de vídeo del canal seleccionado de forma temporal a una velocidad mayor que la nominal, de forma que la reproducción puede empezar rápidamente mientras espera las tramas de referencia del flujo normal. Esta función recibe el nombre de *Instant Channel Change*.
- Para los servicios de vídeo por usuario -Vídeo bajo Demanda (VoD), Grabación de Vídeo Personal (PVR), TV retrasada (*time-shifted TV*), etc.- la optimización de la utilización de recursos de red se basa en una distribución de servidores de contenido en las distintas capas de red, de forma que los contenidos más demandados se encuentren más próximos a los usuarios demandantes.

En la Figura 26 se muestra la estructura de la red de Telefónica que soporta el servicio *triple play* Imagenio.



Fuente: Telefónica de España

Figura 26. Red Imagenio

2.2.3 Normalización

En la actualidad las recomendaciones de la UIT-T recogen toda la normativa referente a los distintos sistemas DSL. En la Tabla 8 se listan los principales estándares, destacándose en **negrita** los más relevantes en la actualidad.

Tabla 8. Recomendaciones UIT-T para sistemas DSL

G.991.1	Transceptores de línea digital de abonado de alta velocidad binaria (HDSL)
G.991.2	Transceptores de línea de abonado digital de alta velocidad de un solo par (SHDSL)
G.992.1	Transceptores de línea de abonado digital asimétrica (ADSL)
G.992.2	Transceptores de línea de abonado digital asimétrica (ADSL) sin divisor
G.992.3	Transceptores de línea de abonado digital asimétrica 2 (ADSL2)
G.992.4	Transceptores para línea de abonado digital asimétrica 2 sin divisor (<i>splitterless</i> ADSL2)
G.992.5	Transceptores para línea de abonado digital asimétrica 2 de anchura de banda ampliada (ADSL2plus)
G.993.1	Transceptores de línea de abonado digital de velocidad muy alta

G.993.2	Transceptores para líneas de abonado digital de velocidad muy alta 2 (VDSL2)
G.994.1	Procedimientos de toma de contacto para transceptores de línea de abonado digital (DSL)
G.995.1	Visión de conjunto de las Recomendaciones sobre líneas de abonado digitales (DSL)
G.996.1	Procedimientos de prueba para transceptores de líneas de abonado digitales (DSL)
G.997.1	Gestión de capa física para transceptores de línea de abonado digital (DSL)
G.998.1	Vinculación multipar basada en el modo de transferencia asíncrono
G.998.2	Agrupación de múltiples pares Ethernet
G.998.3	Agrupación multipar mediante multiplexación inversa por división en el tiempo

2.2.4 Madurez de la tecnología y del mercado

2.2.4.1 HDSL

Se trata de una tecnología en fase de sustitución. Su aplicación en líneas de acceso abonado se circunscribe al acceso de empresas de cierta envergadura. También se usa para interconectar equipos de red (por ejemplo, interconexión de estaciones base de telefonía móvil).

Existe un número importante de suministradores de equipos HDSL, incluyendo tanto grandes fabricantes (por ejemplo, Alcatel-Lucent, Ericsson y Nortel), como medianos (por ejemplo ECI y RAD). Algunos fabricantes ofrecen equipos integrados con SDH (Alcatel-Lucent, Bosch, Fujitsu)

Debido a la existencia de varios estándares, así como soluciones propietarias, habitualmente los módems de usuario y de central han de ser del mismo suministrador. Debido a este inconveniente, está siendo reemplazada por SHDSL/HDSL2, una tecnología normalizada y que, además, es compatible con otros sistemas DSL, y en particular con ADSL.

2.2.4.2 ADSL, SHDSL y VDSL

ADSL es una tecnología muy madura con más de 200 millones de líneas desplegadas en el primer trimestre de 2008. Como se ha visto los puertos de VDSL y SHDSL se suministran en los mismos DSLAMs que los de ADSL y por ello las cifras se dan de forma conjunta. Los precios de equipos han decrecido de manera muy rápida. A mediados de 2008 el coste de una línea ADSL estaba entre 35 y 75 euros, dependiendo de tamaños, volúmenes, mercados, etc. El módem usuario se podía encontrar por debajo de los 30 euros para versiones USB y de los 100 euros para versiones IAD con telefonía sobre ADSL (precios en volumen para operador).

La interoperabilidad demostrada ha permitido la especialización de los suministradores en dos grandes campos: suministradores de DSLAM y

suministradores de equipos de abonado. En la Figura 27 se muestran las cuotas de mercado acumuladas hasta el primer trimestre del 2002, fecha en la que el total de líneas instaladas era de 32 millones. A su lado se muestra la distribución de líneas suministradas a lo largo del año que comprende el último trimestre de 2007 y el tercer trimestre de 2008 y que totalizan 97,8 millones de líneas. De estas un 87% corresponden a ADSL, un 12% a VDSL y menos del 1% a SHDSL. Es de resaltar la irrupción de los suministradores chinos Huawei (líder en los dos últimos trimestres) y ZTE así como la fusión de Alcatel y Lucent.

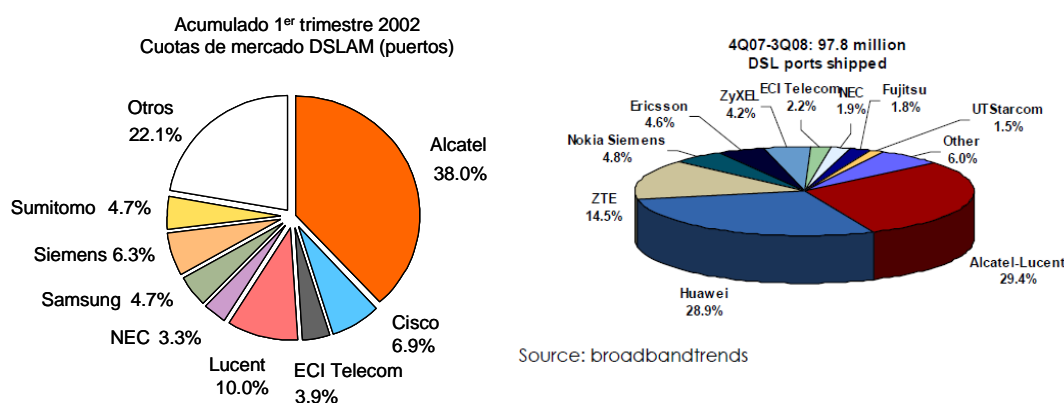


Figura 27. Cuotas de mercado de DSLAM

En la Tabla 9 podemos encontrar un listado bastante completo de suministradores de equipos de usuario (módem-USB, módem NAT, módem-router, IAD, etc.). En el segundo trimestre de 2008 estos suministradores entregaron unos 30 millones de equipos. Puede observarse que los suministradores de equipos DSLAM no chinos han abandonado este mercado.

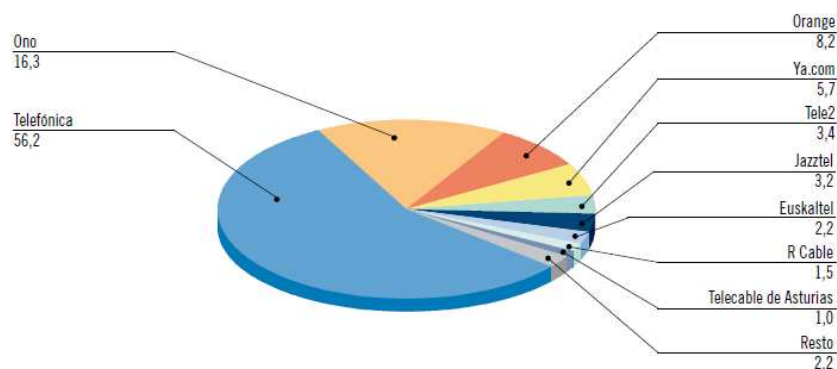
Tabla 9. Suministradores de equipos de usuario

Suministrador	ADSL2+	VDSL2
2Wire	SÍ	SÍ
Actiontec Electronics	SÍ	SÍ
Allied Telesis	SÍ	
Amedia Networks		SÍ
Comtrend	SÍ	SÍ
DrayTek	SÍ	
Entone Technologies	SÍ	SÍ
Huawei Technologies		SÍ
Iskratel Telekomunikacijski Sistemi		SÍ
Motorola	SÍ	SÍ

Netgear	Sí	
Pirelli	Sí	
Sagem	Sí	Sí
SMC Networks	Sí	
Telsey Telecommunications	Sí	Sí
Thomson	Sí	Sí
Tilgin	Sí	
Westell Technologies	Sí	Sí
Xavi Technologies	Sí	Sí
Zhone Technologies	Sí	
Zoom Telephonics	Sí	
ZTE	Sí	Sí

Fuente: www.lightreading.com

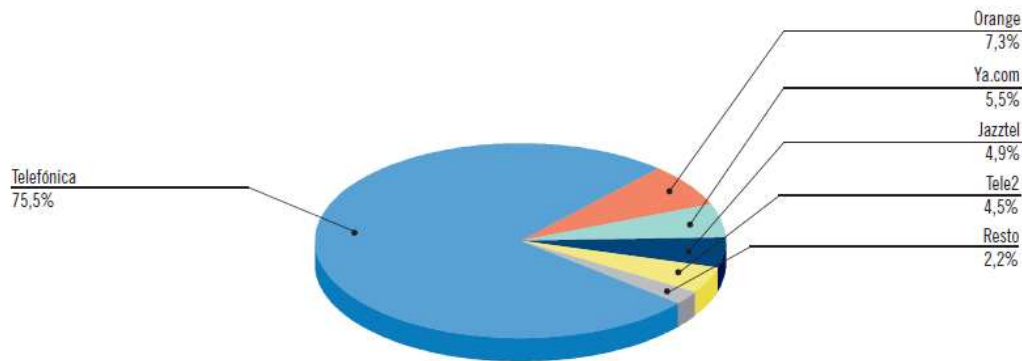
Como ya se ha mencionado, ADSL es la tecnología por excelencia de los operadores establecidos para dar servicios de banda ancha, ya que posee el recurso básico: la planta de pares de cobre. Debido a esto, los reguladores han establecido normas para que los nuevos operadores puedan utilizar esta planta, pagando una cuota al operador establecido, lo que se conoce como Desagregación del Bucle de Abonado o *Local Loop Unbundling* (ver 2.2.7). Analizando el mercado español por número de conexiones de banda ancha según el informe anual de la CMT en el 2007 sobre un número total de 8 millones de conexiones el mercado se distribuía según la Figura 28.



Fuente: CMT (informe anual)

Figura 28. Distribución porcentual de conexiones de BA en España 2007

De estas conexiones ONO, R, Telecable y Euskaltel son operadores de cable, el resto son operadores de DSL. Para tener una idea de la distribución del mercado del acceso DSL en la Figura 29 se muestra la cuota por ingresos de un total de unos 2200 millones de euros en 2007.



Fuente: CMT (informe anual)

Figura 29. Cuota de ingresos xDSL

2.2.5 Prestaciones

2.2.5.1 HDSL y SHDSL (TDM)

Al estar estos sistemas basados en circuitos, la calidad de servicio (QoS) puede medirse en Tasa de Errores y Disponibilidad del Servicio, que en estos casos, y aplicando normas establecidas, se pueden cifrar en 10^{-7} y 0,99999 respectivamente. En cuanto a los caudales ofrecidos al usuario, son constantes: 2.048 kbit/s para interfaces no estructuradas y 1.984 kbit/s para estructuradas.

2.2.5.2 ADSL, VDSL y SHDSL

En estos sistemas con DSLAM ATM conectados a redes ATM, las prestaciones vienen determinadas por las características de las conexiones ATM utilizadas (siendo las más comunes UBR, CBR y VBR-rt), las cuales condicionan tanto la manera en la que se trata el tráfico de usuario en la red, como los caudales medios y de pico admisibles.

El par de cobre es un ambiente hostil, y para mantener la tasa de datos el uso de retransmisiones está descartado recurriéndose al empleo de técnicas FEC (*Forward Error Correction*) muy potentes (Reed-Solomon, códigos trellis), unidas a métodos de protección contra ráfagas de errores como el entrelazado convolucional de bloques.

Cuanto mayor es la protección contra ráfagas, mayor es el alcance del bucle de abonado. No obstante, una desventaja de estas técnicas es el retardo que introducen, que ha de sumarse al debido a otros factores como los mecanismos de conformado de tráfico ATM, los encolamientos, y otros propios del ADSL, (por ejemplo, el asociado a los filtrados de los divisores).

Márgenes típicos de retardo entre el módem de abonado y el DSLAM pueden ser: 18-52 ms con entrelazado profundo, 6-40 ms con entrelazado medio y 2-28 ms sin entrelazado.

En cuanto a seguridad, los sistemas de pares gozan de privacidad intrínseca, ya que a cada usuario le llega una conexión exclusiva desde la central, es decir, no pueden ver el tráfico dirigido a otros abonados, como potencialmente sucede en sistemas con medio compartido: cable, radio, sistemas PON.

En la actualidad reviste especial importancia la calidad en el transporte de vídeo sobre A/VDSL y la cobertura del servicio. Las cifras que se consideran aceptables desde el punto de vista de calidad percibida por el usuario para TV estándar están entre una y dos aberraciones (pixelados, congelaciones, etc.) de la imagen por hora. Por otra parte en la actualidad se requieren varios canales simultáneos por línea, lo que implica, para que el número de líneas que soporten el servicio sea el mayor posible, reducir en lo posible la tasa de bit necesaria. Todo ello hace que, a fin de mantener la calidad percibida del vídeo, actualmente se recurran a técnicas como las siguientes [20]:

- Pasar de la codificación *Constant Bit Rate* (CBR) a *capped Variable Bit Rate*, de forma que se tenga alguna ganancia estadística al transmitir varios canales por el par a una tasa menor que con CBR y con garantía.
- Proporcionar descarte de paquetes inteligente en los DSLAM (en los LTs) para casos de congestión (descartar paquetes que transporten imágenes B y preservar las I y las P).
- Utilizar servidores de *unicast* temporales, no sólo para mejorar los tiempos de zapeo sino también para recuperar pérdidas de paquetes.

2.2.6 Adecuación a los servicios considerados

2.2.6.1 Distribución de TV

2.2.6.1.1 HDSL y SHDSL (TDM)

No tienen ninguna aplicación como sistemas de distribución de TV.

2.2.6.1.2 ADSL y VDSL

Tras múltiples intentos de escaso éxito la introducción de ADSL2+ y VDSL2, la IPTV, los DSLAM IP, la red de agregación basada en Ethernet, y las mejoras en los sistemas de codificación H.264 han permitido alcanzar el objetivo original de la tecnología ADSL que era ofrecer servicios de vídeo sobre el par de cobre, de forma que los operadores de telefonía pudieran competir desde un punto de vista tecnológico con los operadores de cable. Resumiendo:

- Mayores capacidades de la interfaz hacia la red de los DSLAM y abandono del ATM a favor de Ethernet: $n \times \text{Gbit/s}$
- Progresos en la codificación de vídeo (MPEG4) hacen que el número de canales disponibles en cada DSLAM deje de ser un factor limitante.

- Capacidad de *multicast* interno en el DSLAM y en los nodos de agregación, con lo que la ocupación de ancho de banda es por programa y no por usuario.
- Solución de la respuesta rápida al zapeo en el DSLAM (por ejemplo, mediante *IGMP snooping*) y en la red: servidores de *unicast* temporales.

Lo anterior se refiere al reto que ha supuesto la distribución de vídeo sobre ADSL. El Vídeo Bajo Demanda con interactividad completa (y sus asociados: PVR, TV retrasada) es otra aplicación propia de estas arquitecturas IPTV, y un almacenamiento escalonado de contenidos a distintos niveles de red en función de la demanda hace que este servicio tenga sentido económico.

Otra limitación del ADSL es el número de canales simultáneos que pueden ofrecerse al usuario que, con las velocidades pre-comerciales ofertadas para las aplicaciones de vídeo (5 Mbit/s), sería de dos. En el caso de SHDSL, el ancho de banda disponible es menor, por lo que la distribución de vídeo no es factible. Las limitaciones de estos sistemas podrían ser uno de los estímulos para el VDSL.

2.2.6.2 Telefonía

2.2.6.2.1 HDSL y SHDSL (TDM)

Siendo sistemas concebidos para el transporte de 2 Mbit/s o $n \times 64$ kbit/s, estructurados o no; son en principio transparentes al servicio (a la carga que lleven los canales). En la práctica se utilizan para el transporte de los canales telefónicos de centralitas, pero sin intervenir en el servicio.

2.2.6.2.2 ADSL y VDSL

El A/VDSL, además de ser compatible con el servicio telefónico básico sobre el mismo par, puede proporcionar varias líneas adicionales dentro de la banda del ADSL. En la actualidad este servicio se da en forma de VoIP (las aproximaciones de VoATM se pueden considerar obsoletas).

En los locales del usuario se instala un IAD (*Integrated Access Device*), que ofrece una o varias terminaciones RJ45 para Ethernet (suele tener funciones de *router* e incluso de cortafuegos); un interfaz Wi-Fi, y varias terminaciones RJ11 para terminales telefónicos normales. Los canales se suministran sobre una VLAN desde una “pasarela residencial” interna al IAD. La señalización con la red normalmente usa el Protocolo de Inicio de Sesiones (SIP). Ver Figura 30.

Obsérvese que mediante el procedimiento descrito, un segundo operador utilizando desagregación de bucle (ver 2.2.7), bien en modo de compartición de espectro o *bit stream*, podría proporcionar servicio de telefonía transportando voz sobre IP y proporcionar el servicio sobre una red IP propia con calidad de servicio. Para obtener una calidad adecuada, el operador establecido tendría que ofrecer en sus DSLAM VLAN con la prioridad adecuada.

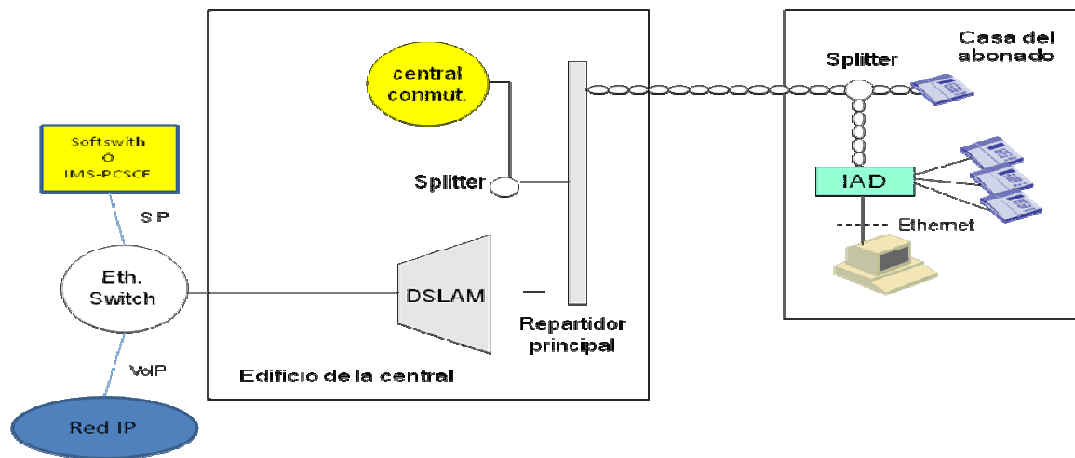


Figura 30. Conexión entre central y casa del abonado

2.2.6.3 Acceso a Internet

2.2.6.3.1 HDSL y SHDSL (TDM)

Se utiliza como técnica de acceso en redes de circuitos alquilados, para establecer enlaces hasta los proveedores de servicio. Normalmente sus clientes son negocios de cierta entidad, por lo que su empleo para acceso a Internet no tiene mucho sentido.

2.2.6.3.2 ADSL, VDSL y SHDSL (ATM)

El acceso a Internet es la única aplicación del ADSL en DSLAM ATM en la actualidad. Proporciona ancho de banda suficiente y su asimetría está, afortunadamente, en el sentido del tráfico de los usuarios de acceso a Internet (de la red al usuario).

El tráfico Internet va sufriendo variaciones de su perfil: usuarios (sobre todo pequeñas empresas) que ponen en línea sus servidores, intercambio de ficheros, etc. Esto hace que el tráfico se haga más simétrico, o incluso invierta su perfil, situación en la que el SHDSL, un sistema simétrico, puede ser más adecuado⁷.

Los sistemas basados en IP DSLAM y red de agregación IP/Ethernet ofrecen incluso mayores funcionalidades. En el diseño de la red de agregación se ofrece mayor ancho de banda (por ser de diseño más reciente), menor factor de concurrencia, para hacer frente a los servicios de *streaming* y mejor soporte de las arquitecturas p2p (*peer to peer*).

2.2.6.4 Servicios interactivos (juegos,...)

En servicios interactivos podemos englobar todas las clases de vídeo, música, noticias, etc., bajo demanda, con diferentes grados de interactividad. Desde el punto

⁷ Obsérvese que no es posible “darle la vuelta” a un sistema ADSL por la gestión del espectro dentro de los mazos: interferiría con todos los ADSL “normales”.

de vista de acceso ADSL, lo que se requiere en estos casos es garantía de ancho de banda hacia el usuario, y unos tiempos de latencia adecuados, que son perfectamente alcanzables con la tecnología actual. En el caso de juegos en Red, el esquema del servicio con los jugadores conectándose a un servidor (*game room*) e intercambiando básicamente comandos de desplazamientos y acciones sobre escenarios previamente cargados, no plantea exigencias especiales (salvo mantener la latencia baja).

2.2.6.5 Otros (*videoconferencia, VPN, etc.*)

Estos servicios generalmente son soportados a nivel IP por funciones de autenticación y seguridad del acceso que residen en los Servidores de Acceso a Banda Ancha. La videoconferencia y las aplicaciones p2p requieren adicionalmente simetría en los anchos de banda.

Puesto que la calidad de la imagen requerida para una videoconferencia no tiene que ser extremadamente buena y el servicio es propio de entornos de negocio las interfaces SHDSL son las más adecuadas.

2.2.7 Aspectos regulatorios

Como cabría esperar, la tecnología ADSL es principalmente una tecnología de operadores establecidos. La planta exterior de pares de cobre pertenece en su inmensa mayoría a los primeros operadores, que la han ido desplegando desde la invención del teléfono en 1876. Este hecho constituye una posición de ventaja competitiva frente a cualquier nuevo operador: el operador establecido, que posee el par (la conexión al usuario), parte con ventaja en cualquier escenario de libre competencia. Es un hecho que se inscribe dentro del concepto, muy contestado, de "monopolio natural".

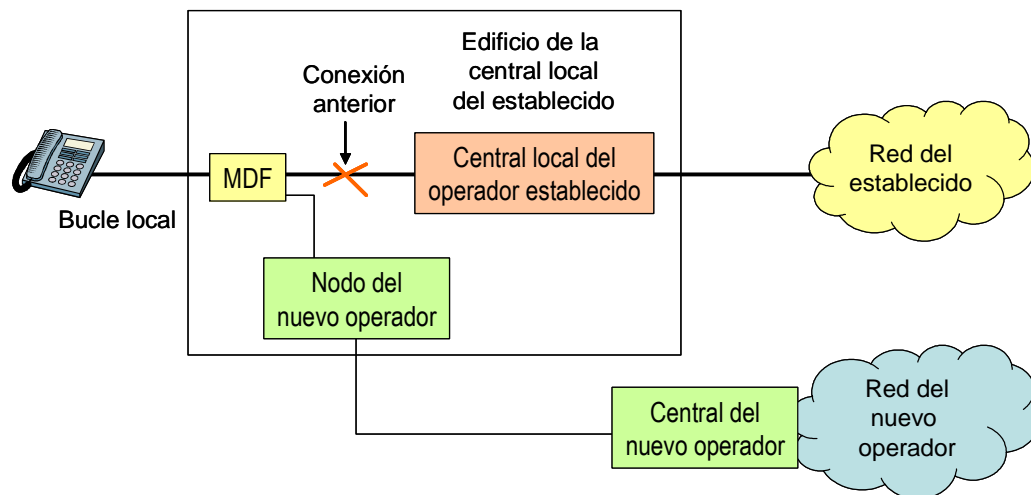
La liberalización de las telecomunicaciones, comenzada en EE.UU. en 1986 con el *Communication Act*, y seguida en el resto del mundo con similares medidas que favorecen la competencia, ha llevado al concepto de Desagregación del Bucle de Abonado (*Local Loop Unbundling*). Su principio es muy sencillo: el operador establecido ha de ceder al nuevo operador la conexión a "su abonado". El nuevo operador paga una cuota mensual por el mantenimiento del bucle al operador establecido: no podemos olvidar que el par desagregado sigue yendo en un cable con otros pares que pertenecen al operador establecido. Una de las hipótesis del ejercicio es que el par ya está amortizado, e incluso, ha sido subvencionado por los años de monopolio que normalmente ha disfrutado el operador establecido.

La desagregación del bucle es una de las acciones de la Comisión Europea, acordada en la cumbre de Lisboa de diciembre de 2000, para: favorecer la competencia en las redes de acceso; incrementar la penetración de los servicios de banda ancha: acceso a Internet de Alta Velocidad, Multimedia, etc.; y reducir el precio de los servicios avanzados de telecomunicación.

La Comisión recomienda tres alternativas de Desagregación de Bucle, aunque sólo obliga a regular la Desagregación completa, mostrada en la Figura 31. La idea,

aunque sencilla, da origen a una reglamentación muy compleja. En España se publica la primera Oferta de acceso al Bucle de Abonado (OBA) en enero de 2001, experimentando una revisión profunda en abril de 2003, fruto de la experiencia adquirida, donde se modifican hasta 50 clases de servicios y precios ofrecidos por Telefónica. En mayo de 2008 se publica un nuevo texto consolidado por la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones [21]. En este documento se regulan las obligaciones y precios de los distintos servicios que el operador establecido debe procurar al nuevo operador:

- Cuota mensual (que suele ser una cantidad muy parecida a la que paga el usuario particular por su cuota de abono).
- Espacios que el operador establecido debe proporcionar en su edificio, así como el precio de su alquiler.



El nuevo operador obtiene acceso al par de cobre

El nuevo operador instala equipo en la Central local del operador establecido

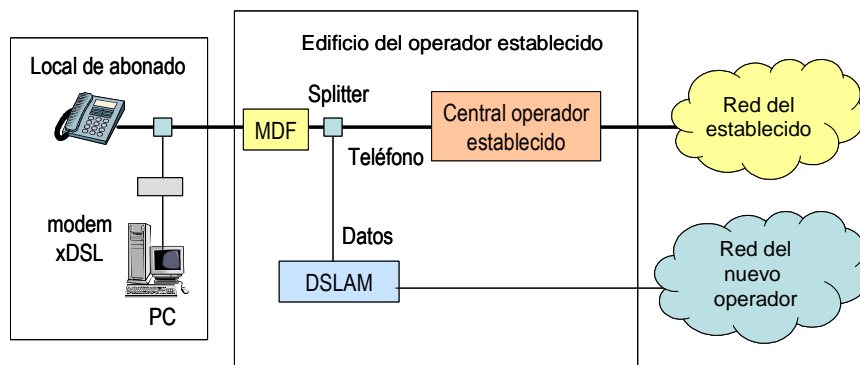
El nuevo operador puede instalar equipo para ofrecer BA sobre xDSL

Figura 31. Desagregación de bucle completa

- Precios de los cableados desde el Repartidor Principal hasta la ubicación del nuevo operador.
- Número máximo de usuarios de banda ancha que se pueden proporcionar en un mazo de 25 pares (para evitar problemas de diafonía, tal como se describe a continuación).
- Medidas de seguridad de acceso al edificio, así como precio que el nuevo operador deberá abonar por acceder al mismo.

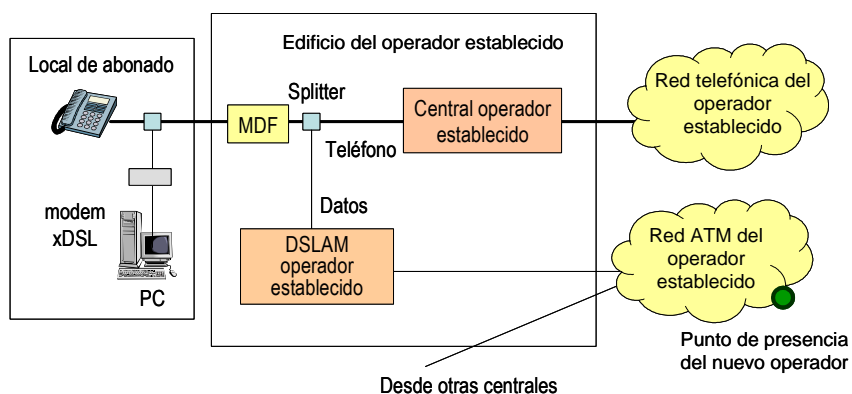
Todas estas medidas son el resultado de prolijas negociaciones entre operadores, con el regulador como árbitro. Las negociaciones en sí constituyen una barrera de entrada, ya que retrasan el comienzo del negocio del nuevo operador.

Por el contrario, la desagregación del bucle puede tener efectos contraproducentes al desarrollo de las telecomunicaciones puesto que desincentivan las inversiones del operador establecido en la mejora y modernización de su planta, ya que de alguna forma son forzados a cederla a los nuevos operadores. Y, por el mismo motivo, los nuevos operadores se retraen de invertir en sus propias redes de acceso. Las otras dos opciones de desagregación del bucle se dirigen precisamente a operadores que, en principio, sólo pretenden proporcionar servicios de banda ancha. Se trata de la compartición de espectro en el par y el acceso a nivel de datos (*bit stream access*), representadas en la Figura 32 y Figura 33 respectivamente.



El nuevo operador accede a la parte superior del espectro para DSL
 El operador establecido conserva el servicio telefónico
 Se necesita instalar splitter en la Central local

Figura 32. Desagregación de bucle por compartición de espectro



El nuevo operador accede al chorro de bits del DSL
 El operador establecido instala el DSLAM en la central
 El operador establecido entrega los datos multiplexados en el PoP del nuevo operador

Figura 33. Desagregación de bucle a nivel de caudal digital

Respecto a los límites de diafonía, cabe señalar que aunque es posible el establecimiento de modelos teóricos para la evaluación de la diafonía (ver [14]) la práctica se derivan capacidades máximas en mazos de pares mediante medidas

sobre planta real. Los límites se establecen por el número de sistemas DSL que pueden colocarse dentro de un determinado mazo. En la OBA se definen Unidades Básicas de 25 pares, que se corresponden con los cables mayoritariamente usados en el extremo de abonado. En función de la atenuación en decibelios a 160 kHz, se definen seis longitudes (ver Tabla 10). En la Tabla 11 se describen los límites del número de sistemas que pueden habilitarse en un mazo de 25 pares. Sólo se muestran los sistemas más significativos. En la OBA se puede encontrar una lista de sistemas mayor: HDB3, HDSL, etc.

Tabla 10. Clasificación de pares de cobre

Denominación	Atenuación a 160 kHz	Longitud aproximada
Unidad Básica extra Corta (UBeC)	≤ 9 dB	≤ 800 m
Unidad Básica muy Corta (UBmC)	≤ 13 dB	≤ 1100 m
Unidad Básica Corta (UBC)	≤ 17 dB	≤ 1400 m
Unidad Básica Media (UBM)	$17 \text{ dB} < X \leq 28 \text{ dB}$	$1400 \text{ m} < L \leq 2300 \text{ m}$
Unidad Básica Larga (UBL)	$28 \text{ dB} < X \leq 40 \text{ dB}$	$2300 \text{ m} < L \leq 3300 \text{ m}$
Unidad Básica muy Larga (UbmL)	> 40 dB	> 3300 m

Tabla 11. Capacidades máximas en mazos de pares

Longitud	ADSL	ADSL2+	SHDSL	VDSL2 PSD: B8-1, B8-3, B8-4, B8-7, B8-11	VDSL2 PSD: B8-2, B8-6, B8-12
UBeC	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	16/25	25/25	4/25
UBmC	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	16/25	25/25	4/25
UBC	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	16/25	25/25	4/25
UBM	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 25/25 RDSI 4/25	16/25	25/25	4/25
UBL	Sobre POTS 16/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 16/25 RDSI 4/25	16/25	NA	NA
UbmL	Sobre POTS 16/25 RDSI 4/25	Sobre POTS 16/25 RDSI 4/25	16/25	NA	NA

2.2.8 Escalabilidad

2.2.8.1 HDSL/SHDSL (TDM)

Son sistemas con un crecimiento muy lineal, salvo en lo referente a la instalación inicial del armario de terminación en central. Haciendo abstracción de este escalón inicial, la granularidad en los equipos de central es baja (4-8 líneas por tarjeta), lo que permite un crecimiento ajustado a la demanda.

La instalación requiere una comprobación precisa de los pares, que en cualquier caso está justificada económicamente por los servicios proporcionados sobre estas interfaces.

Aunque la gestión es por elemento (no existe concepto de red), se puede centralizar en plataformas que gestionen de manera remota del orden de mil usuarios.

2.2.8.2 ADSL, VDSL y SHDSL

En el acceso ADSL, el elemento que determina la escalabilidad es el DSLAM. En la Figura 34 se muestra un esquema conceptual de un DSLAM, señalando aquellos elementos que determinan su escalabilidad.

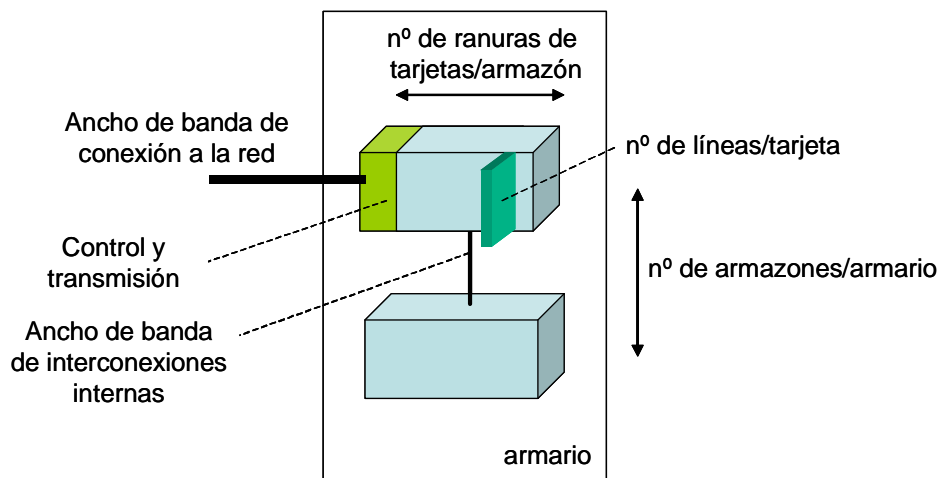


Figura 34. Modularidades de un DSLAM

El primer mercado objetivo de los DSLAM ha sido los modelos para centrales locales de operadores establecidos, obteniendo la mejor eficiencia en coste para estas configuraciones. Con estas premisas se realizan configuraciones lo más grandes posibles en cuanto al número de abonados, de forma que se minimiza la repercusión en coste de las partes comunes, tanto en lo relativo a control y transmisión, como a la infraestructura mecánica, de alimentación, de refrigeración, alarmas visuales y externas.

- Control y Transmisión: controla el establecimiento, monitorización y prioridades en el *Bridge-Router*; integra generalmente la terminación de las

líneas de la transmisión óptica; proporciona la interfaz de gestión (modelo de información y pila de protocolos)

- Infraestructura mecánica, alimentación, refrigeración, alarmas visuales y externas.

El coste fijo que significan estos elementos determina un movimiento hacia una mayor integración del equipo, con una mayor densidad de líneas por tarjeta (favorecida por el desarrollo de nuevas generaciones de circuitos integrados ADSL) y sistemas multiarmazón (*multi-shelf*). No obstante, aún existen limitaciones debidas a la capacidad de la conexión hacia la red, así como de las interconexiones entre armazones y, en su caso, entre armarios. Otro factor limitador es la elevada disipación que se produce en las líneas ADSL las cuales en principio se encuentran siempre activas.

Otro factor adicional que influye en la escalabilidad, a veces olvidado, es el sistema de gestión. Los que se ofrecen actualmente permiten gestionar unas 100.000 líneas, en cuyo caso su repercusión sobre el precio total no supera el 5% del coste de la línea. No obstante, si las dimensiones de la red son mucho menores, es necesario prestar mucha atención a este factor.

En la Tabla 12 se resumen las densidades de los DSLAM comercializados por los principales suministradores, así como de las interfaces de red de mayor velocidad que proporcionan. Estas configuraciones de central son las más efectivas en coste por línea. Sin embargo, para cubrir centrales pequeñas, o para segundos operadores trabajando en desagregación de bucle, que no tienen tanta penetración como los establecidos, existen equipos más compactos: en un rango entre las 48 a 400 líneas por sistema.

Tabla 12. Suministradores de DSLAM. Equipo de Central

	Alcatel-Lucent	Huawei	ZTE
Líneas/tarjeta	48	64	48
Líneas/armazón	864	896	720
Líneas/armario	1728	2688	720
Líneas/nodo ⁸	3456	2688	720
I/F a red ⁹	8 * GEth	6 * GEth	GEth

Cabe también señalar la existencia de versiones compactas de intemperie, especialmente adecuadas para servir a abonados que terminan en concentradores remotos (Unidades Remotas de Abonado, *Digital Line Concentrators*, etc.). Los sistemas ADSL comportan una dificultad añadida en versiones de intemperie por su

⁸ Algunas configuraciones incorporan los *splitters*, mientras otras no.

⁹ Se indica la máxima velocidad, todos tienen interfaces de velocidades inferiores, y prácticamente todos tienen en planes STM-4 y Gigabit Ethernet.

disipación. En el despliegue inicial de ADSL, estos abonados remotos “no cualificaban” para el servicio. En la actualidad existen versiones compactas de DSLAM, en la Tabla 13 se muestran las características de algunas de estas configuraciones.

Tabla 13. Suministradores de DSLAM. Equipos Remotos

	Alcatel-Lucent	Huawei	ZTE
Líneas/tarjeta	48	24	48 ADSL 24 VDSL
Líneas/equipo	48	24	144 ADSL
Tipo	<i>Pizza box</i>	<i>Pizza box</i>	
I/F a red ¹⁰	1 * GEth	100Base-Fx	100Base-Fx

Otros nodos de despliegue remoto son los concentradores remotos de nueva generación *New Generation DLC* (NG-DLC), *Integrated Multiservice Access Platform* (IMAP), *Multiservice Access Nodes* o *Multiservice Access Platforms* (MSAP), diseñados desde el origen para soportar la mezcla de unidades DSL, POTS y RDSI en cualquier proporción.

Uno de los aspectos a tener en cuenta, tanto en la instalación inicial como en la operación posterior, es el coste de los desplazamientos de operarios a los locales de los abonados. Aunque esto es necesario en la explotación telefónica convencional, en el caso del ADSL se ve agravado por los siguientes factores:

- Complejidad del servicio final a proporcionar. En el caso de Acceso a Internet, un tercio de las incidencias de abonado tienen que ver con la instalación de los *drivers* en su PC.
- Calificación de pares antes de ofrecer el servicio o cuando el servicio se degrada. Los elementos de prueba automática para caracterizar bucles en los rangos de uso de los sistemas ADSL no están muy extendidos. Además, se debe llevar un registro de la utilización de los mazos para gestión del espectro. Dependiendo del volumen de despliegue, puede optarse por la calificación a priori o a posteriori (esto es, solamente en caso de fallo).
- Integración de los sistemas de gestión de elementos de red. Hay que asegurar que los gestores de elementos proporcionan las interfaces adecuadas a los gestores de red, y que éstos disponen de las aplicaciones necesarias. Este razonamiento es extensible a los gestores de servicio (por ejemplo, vídeo distribución o vídeo bajo demanda).

¹⁰ Se indica la máxima velocidad, todos tienen interfaces de velocidades inferiores y prácticamente todos tienen en planes STM-4 y Gigabit Ethernet.

2.2.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Los equipos de central están diseñados para operar dentro del entorno controlado de un edificio de telecomunicaciones, con aire acondicionado. Este requisito es esencial en el caso de los DSLAM por su elevada disipación.

Como se ha indicado, existen también versiones de intemperie. Estos equipos requieren cabinas con volúmenes y sistemas de climatización (por ejemplo intercambiadores de calor) adecuados a fin de soportar la disipación. Esto encarece de manera importante el precio de las versiones intemperie, situándose su coste en torno a un 50% superior al de un equipo de central equivalente.

Los sistemas VDSL2 usan la banda hasta los 30 MHz, pueden producir interferencias en la banda de radio comercial y aficionado. La radiación se produce en el tramo de acometida a los usuarios. Esta acometida puede realizarse con par paralelo en vez de trenzado y no va soterrada en la mayoría de las ocasiones todo lo cual favorece la producción de interferencias.

2.3 Fibra óptica (FTTx)

2.3.1 Motivación original y evolución

En este capítulo abordaremos las configuraciones de acceso de fibra hasta el usuario, *Fiber To The Home (FTTH)*, *Fiber To The Premises (FTTP)*, *Fiber To The User (FTTU)*, *Fiber To The Office (FTTO)*, aunque ocasionalmente haremos referencia a otras aproximaciones de despliegue profundo de fibra en la planta, *Fiber To The Cabinet (FTTCab)*, *Fiber To The Curb (FTTC)*, *Fiber To The Building (FTTB)*¹¹, cuyo último tramo aprovecha las acometidas o cableado de edificio de la planta de cobre con tecnología VDSL2 y que se tratan en el capítulo correspondiente.

Sin temor a equivocarnos podemos decir que la fibra hasta el usuario es la tecnología de acceso fijo objetivo final, superior a todas las demás desde el punto de vista técnico... desde hace más de 30 años. Esta superioridad se evidencia en características tales como: capacidad casi ilimitada; bajas pérdidas de transmisión que implican gran alcance y posibilidad de división de potencia; pequeño diámetro y peso, lo que facilita muchos aspectos importantes de su despliegue en planta; resistencia a las agresiones del entorno: penetración de agua, rayos, interferencias electromagnéticas; difícil de “pinchar”... y guarda un potencial de coste reducido que aún está por materializarse.

En los últimos cinco años se observan las primeras etapas de un despliegue significativo de acceso de fibra hasta el usuario a nivel mundial que se estima del orden de los 20 millones, un orden de magnitud menos que los usuarios de tecnologías DSL (238 millones, segundo trimestre de 2008). El despliegue profundo de fibra hasta el usuario responde a las previsiones de la demanda de los usuarios y su reflejo en las características del tráfico generado:

- Mayor demanda de servicios que consumen gran ancho de banda, particularmente la introducción de la TV de Alta Definición y la videoconferencia.
- Paquetización de la voz.
- Cada vez mayor peso del tráfico de flujos de vídeo lo cual implica una menor ganancia estadística en el tráfico multiplexado.
- Nuevos requisitos de calidad de servicio debido a los nuevos servicios.

En la Figura 35 se muestra una estimación para el 2010 de una agrupación de servicios y los anchos de banda de pico requeridos [22]. Cabe señalar que la relación pico/media, y por tanto el margen de sobre-suscripción, son mucho menores que los que se tenían en el acceso de alta velocidad a Internet como muestra la Figura 36.

¹¹ Podríamos ampliar este “FTT-siglarlo”, completarlo lo consideramos misión imposible, con términos procedentes de las técnicas *Hybrid Fiber Coax: Fiber To The Last Amplifier (FTTLA)*, *Fiber To The Service Area (FTTSA)*...

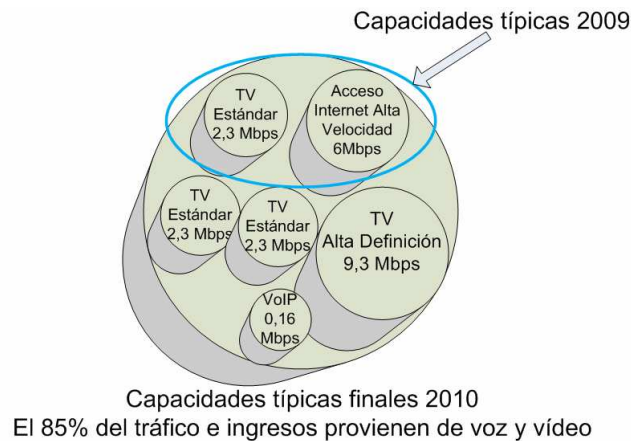


Figura 35. Consumos típicos de ancho de banda por servicio

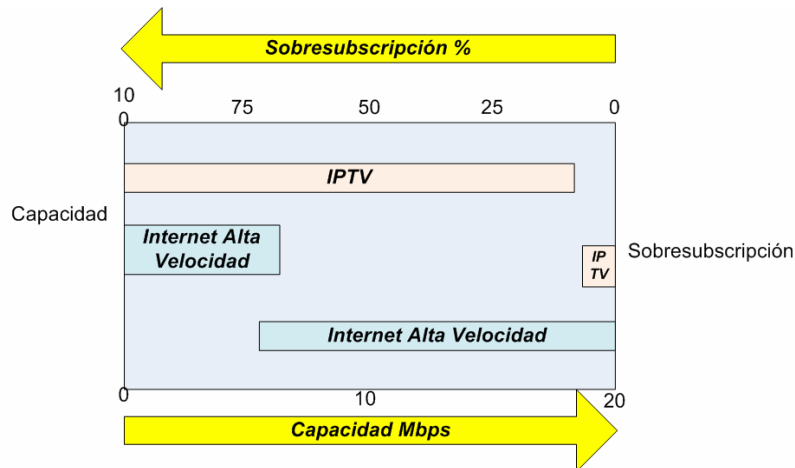


Figura 36. Menor capacidad de sobre-suscripción

Como decíamos anteriormente las tecnologías de fibra hasta el usuario o sus proximidades son una promesa que no ha terminado de materializarse desde hace más de 30 años. Ciñéndonos a las tecnologías de banda ancha que han sido estandarizadas nos encontramos con las reflejadas en la Tabla 14.

En dicha tabla se muestran los sistemas PON (*Passive Optical Network*) de banda ancha. Este tipo de configuraciones, permite el despliegue de una sola fibra desde la cabecera de red (un solo transceptor óptico), a partir de la cual se pueden derivar un cierto número de ramificaciones (típicamente hasta 32) para dar servicio a otros tantos usuarios a través de la red de distribución óptica compuesta por cables de fibra, divisores pasivos y acopladores. Este tipo de configuraciones son las más desplegadas en entornos residenciales o mixtos donde no hay grandes empresas. También existen las configuraciones punto a punto, que algunos operadores propugnan como solución universal, estas configuraciones están dominadas

actualmente por la técnica Ethernet Activa, que es el acceso punto a punto definido por el IEEE en su iniciativa 802.3ah *Ethernet in the First Mile* (EFM).

Tabla 14. Sistemas PON de banda ancha

	Estándar	Capacidad (Mbit/s)	Divisiones	Alcance	Transporte
APON	UIT-T G.983.1	155, 622, 1244 (bajada) 155, 622 (subida)	32	20 km	ATM
BPON	UIT-T G.983.3	155, 622, 1244 (b) 155, 622 (s)	32	20 km	ATM + analog lambda video
EPON	IEEE 802.3ah	1000 (b), 1000 (s)	32	10, 20 km	Ethernet
GPON	UIT-T G.984.1	155, 622, 1244, 2488 (b) 155, 622, 1244, 2488 (s)	64, 128 (futuro)	20 km	Ethernet, TDM, ATM,

2.3.2 Estructura y elementos de red

2.3.2.1 Configuraciones punto a punto

Las configuraciones punto a punto tienen una primera aplicación en el acceso a negocios. Cabe señalar que estas configuraciones de acceso basadas en fibra a negocios punto a punto han tenido distintas configuraciones como ESCON, FICON, *Fibre Channel*, SDH. Todas ellas en la actualidad están siendo o serán sustituidas por Ethernet Activa de 1 Gbit/s y 10 Gbit/s. Otros nombres de la Ethernet Activa: *Star Architecture*, *Point-to-Point*, *Home Run Fiber*, *Ethernet FTTH*.

Pero las configuraciones de acceso punto a punto también son elegidas por algunos operadores para el acceso residencial [23]. Los argumentos a favor de esta elección son: por un lado la flexibilidad de introducir nuevos servicios de mayor ancho de banda en el futuro. Por otro, poder realizar esta ampliación particularizando para cada usuario, dado que se puede actualizar el equipo de central y puesto que Ethernet aporta capacidades compatibles con las inferiores, los equipos de cada usuario se pueden ir actualizando según requiera los nuevos servicios. De esta forma se puede diferenciar el servicio de los usuarios más exigentes y que por tanto producen mayores ingresos.

Aunque una topología punto a punto requiere una fibra por usuario desde la central, el coste de la fibra y su tendido no repercute de forma importante siempre que exista espacio en los ductos para el tendido de las nuevas fibras y no haya que desplegar nuevos ductos. Análogas consideraciones se pueden hacer para casos de tendido aéreo sobre rutas de postes existentes.

Más significativo desde el punto de vista del coste es la repercusión de tener una terminación de línea óptica por abonado en la central y el espacio y consumo del equipo necesario en la central. Estos accesos Ethernet punto a punto sobre fibra

siguen los estándares del IEEE 802.3ah cuyas características de capa física se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15. Características de la capa física Ethernet sobre fibra punto a punto

1000Base-LX, con láser de rango de temperatura extendida	5 km	Monomodo
1000Base-X	10 km	Monomodo
100Base-X	10 km	Monomodo

Obsérvese que desde un punto de vista de alcance las áreas de servicio que se obtienen cubren las áreas de servicio de las centrales de telecomunicación europeas. Esto hace que en áreas densamente pobladas, con usuarios de servicios de telecomunicación de alta demanda de prestaciones, algunos operadores europeos¹², amén de algunos asiáticos, estén eligiendo este tipo de configuración punto a punto, sobre todo en despliegues de planta exterior nueva, por ejemplo nuevas urbanizaciones, por su flexibilidad y garantía de evolución. En la Figura 37 se muestra una arquitectura típica de estas configuraciones de acceso.

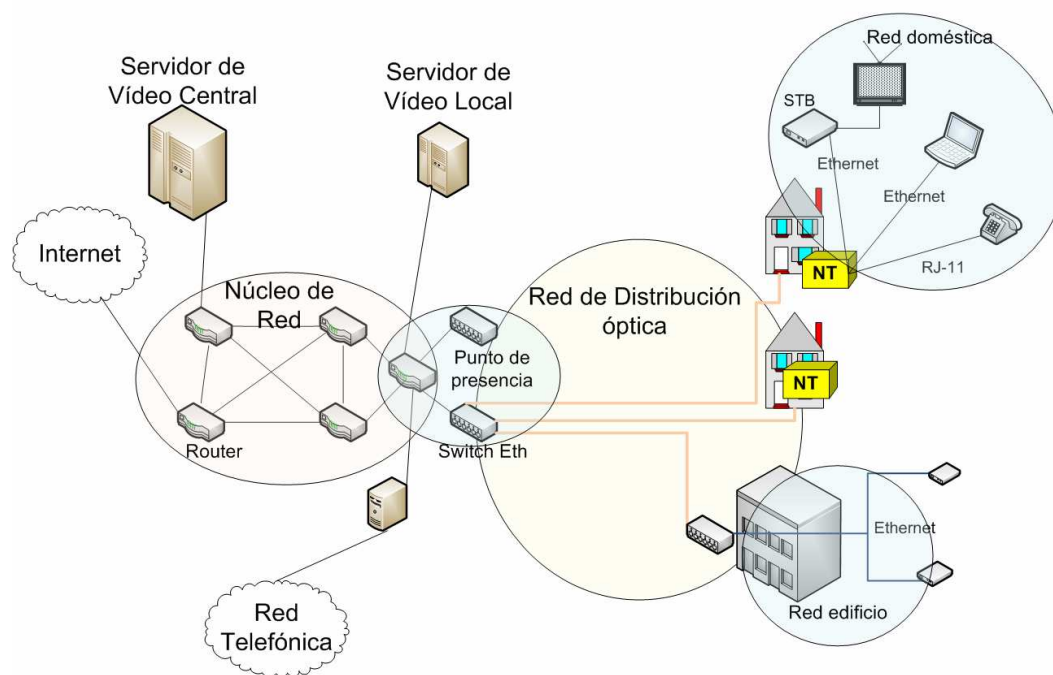


Figura 37. Arquitectura típica de configuraciones de acceso de Ethernet Activa

Resumiendo las ventajas de las configuraciones punto a punto de Ethernet Activa:

¹² En Europa los operadores que están adoptando este tipo de configuración son los nórdicos: Dinamarca, Suecia, que han sido líderes en el despliegue de fibra, aunque tienen a favor su demografía, por su tamaño, nivel de renta y distribución.

- Medio dedicado por usuario:
 - Proporciona alta seguridad, no hay necesidad de cifrado
 - Facilidad para mejora de prestaciones por usuario
 - Evita la posibilidad de que un abonado interfiera en las comunicaciones de otros (*jamming*)¹³
 - Interoperabilidad entre equipos de central y usuario “trivial”: es Ethernet
 - Por ser Ethernet facilita la auto-instalación del equipo de usuario.
 - ¡Es susceptible de desagregación de bucle análoga al cobre!

Todo esto, como se indica anteriormente, al precio de más fibras y más terminaciones de línea del lado central, más espacio para el equipo de central y mayor consumo y disipación.

2.3.2.2 Redes ópticas pasivas (PONs)

Este tipo de configuraciones, permite el despliegue de una sola fibra desde la cabecera de red (un solo transceptor óptico), hasta un punto a partir del cual se pueden derivar un cierto número de ramificaciones (típicamente los estándares especifican hasta 32) para dar servicio a otros tantos abonados. Los elementos básicos de una PON son: el terminador óptico de línea (OLT, *Optical Line Termination*), ubicado en la cabecera de red, es decir, en la central; los terminadores ópticos de red (ONT, *Optical Network Termination*), situados en las instalaciones de abonado; y la red de distribución óptica (ODN, *Optical Distribution Network*), compuesta por cables de fibra, divisores pasivos y acopladores.

Las primeras especificaciones para redes ópticas pasivas fueron definidas por el comité FSAN (*Full-Service Access Network*). Este organismo, constituido en 1995, elaboró el estándar para PONs basado en tecnología ATM, que se conoce como APON (ATM PON). Posteriormente, este mismo organismo, en colaboración con la UIT-T, decidió extender las características de este sistema con objeto de no limitar la oferta de servicios a ATM, dando lugar al estándar BPON (*Broadband PON*). Esta línea de evolución ha desembocado en el presente estándar para PONs a velocidades superiores a 1 Gbit/s, denominado GPON (Gigabit PON) y ya tiene prevista una evolución hasta los 10 Gbit/s. El GPON está respaldado por la UIT-T y ha sido elegido en USA por Verizon en su sistema FiOS [24], que evoluciona el de BPON que ya tiene instalado manteniendo la distribución de la TV en radiofrecuencia sobre la fibra (ver Figura 38). AT&T, que absorbió a SBC (Proyecto Pronto), despliega fundamentalmente FTTN, con acometida VDSL, y en nuevos despliegues utilizará GPON FTTH. En Europa el sistema PON elegido por los operadores, y particularmente por Telefónica, es GPON. Aunque en la actualidad predomina el acceso Ethernet Activa a nivel europeo.

¹³ Por ejemplo, en una configuración PON si un usuario se queda con el láser permanente encendido inhabilita todo el PON.

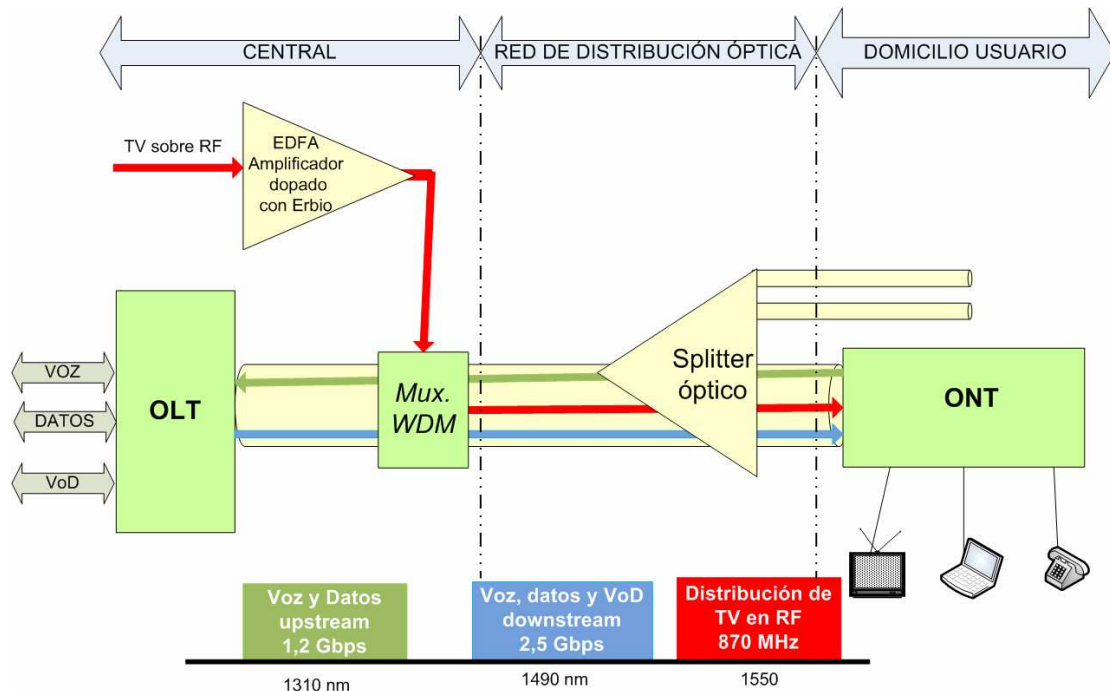


Figura 38. Arquitectura del acceso FiOS de Verizon

Existe otra aproximación proveniente del campo de la EFM (*Ethernet in the First Mile*) del IEEE, que ha definido el GEAPON (Gigabit Ethernet PON). Aunque el despliegue de esta tecnología se limita prácticamente a Japón, es la tecnología de acceso a fibra con mayor número de usuarios, 11 millones en la actualidad, debido a la política de promoción del operador japonés incumbente NTT [25]. Estas cifras además hacen que se hayan conseguido unos costes más bajos para esta tecnología.

Capítulo aparte merecen las aproximaciones que está tomando la industria del cable para pasar de sus estructuras HFC actuales, FTTN, a estructuras FTTH. Aunque la posición de partida de los operadores de cable ha sido ventajosa, ya que tienen el despliegue de fibra más profundo, si examinamos con detenimiento su infraestructura actual nos encontramos que a sus ONTs llega una fibra compartida en dirección usuario y vuelve una por ONT "aguas arriba". Una ONT puede atender entre 80 a 500 usuarios a través del cable coaxial. Los nuevos despliegues de fibra de los operadores de telecomunicación provenientes del campo de la telefonía resultan en despliegues de fibra más ricos, que pueden ir desde una fibra no compartida por usuario en despliegues de Ethernet Activa, hasta cifras de entre 8 (típico) y 32 (máximo) en arquitecturas PON.

La primera aproximación para estos operadores puede consistir en la utilización de WDM en su fibra instalada, evitando el tendido de nueva fibra. Un primer paso consiste en desdoblarse los nodos (ONT) instalados de forma que los servicios punto a punto (ver en Figura 39 la distribución de servicios por frecuencia) en los tramos coaxiales sean independientes, transportando estos servicios punto a punto en diferentes longitudes de onda sobre la fibra instalada.

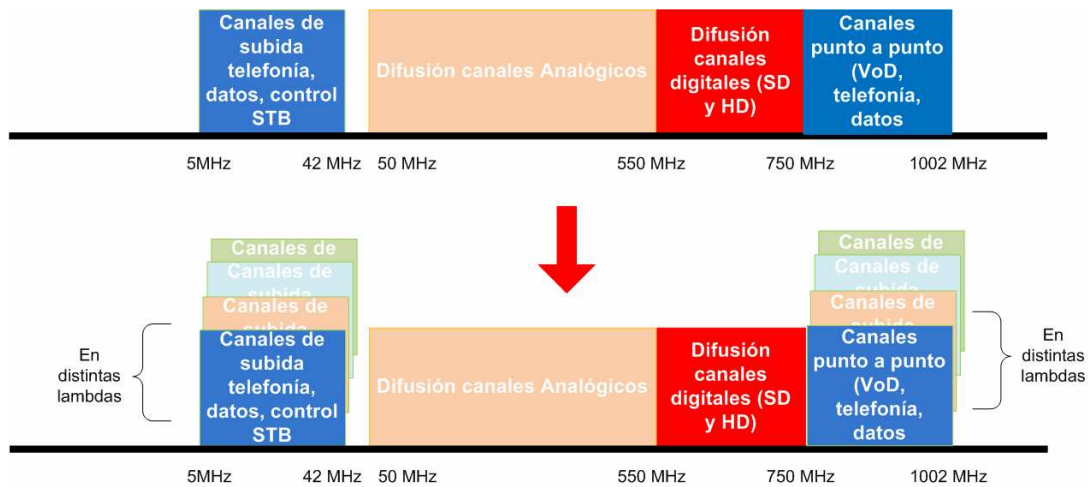


Figura 39. Distribución de servicios en frecuencias y desdoblamiento de lambdas

La multiplexación en lambdas puede ser densa o gruesa (*coarse*), ver Figura 40, siendo la densa más cara y más difícil de gestionar pero la que puede soportar mayor número de lambdas y consecuentemente mayor capacidad de transporte y desdoblamiento. Adicionalmente al operar en tercera ventana puede ser amplificada de forma óptica con amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), con lo cual se consiguen mayores alcances del tendido de fibra.

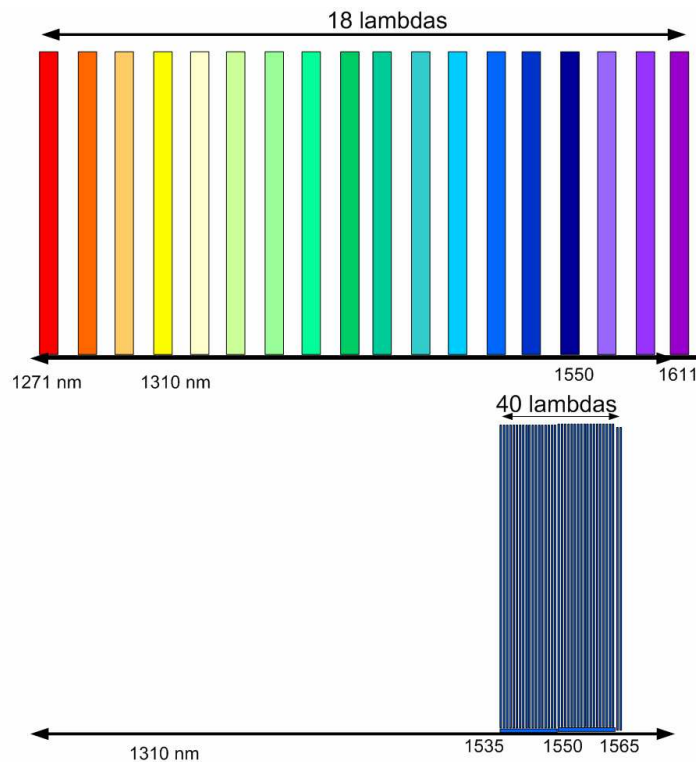


Figura 40. Espectros CWDM y DWDM

La multiplexación óptica tiene problemas de diafonía Raman, *Four-Wave Mixing*, dispersión y modulación cruzada de fase. Motorola ofrece una tecnología, Enhance-CWDM que mitiga estos efectos perniciosos con alcances de 30 km y factores de desdoblamiento de hasta 8 [26]. Alloptics¹⁴ ofrece una solución llamada RFoG (*Radio Frequency on Glass*) para convertir una red HFC en una red FTTH manteniendo los actuales equipos utilizados en las cabeceras HFC (CMTS, HDT, distribución de vídeo) y los *set-top boxes* de usuario, es decir, ofrece una migración a los operadores de cable hacia una red FTTH manteniendo una parte muy significativa de sus equipos desplegados, y conservando también en gran medida su sistema de gestión de red y servicios. En la Figura 41 se muestra como se evoluciona una red HFC a la arquitectura RFoG.

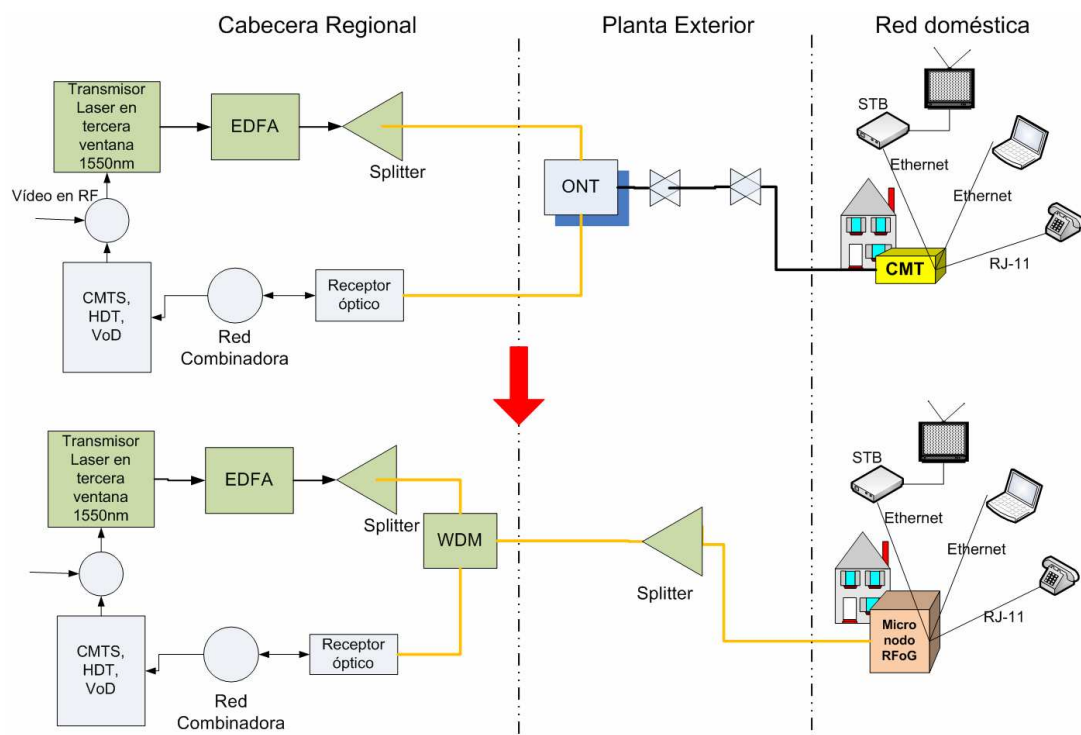


Figura 41. Evolución de una arquitectura HFC a una arquitectura RFoG

Las ventajas de esta migración pueden resumirse en:

- Se eliminan elementos activos, y consecuentemente la necesidad de alimentarlos en la planta exterior.
- Se garantizan las mejores calidades de transporte al sustituir la transmisión eléctrica (coaxial) por óptica, por lo tanto se consiguen capacidades que una arquitectura HFC sólo contempla como máximos teóricos.

¹⁴ Alloptics ha suscrito un acuerdo con Motorola (10/02/2009) por el que Motorola obtiene derechos exclusivo para ofrecer RFoG a sus clientes.

- La misma infraestructura de distribución óptica puede ser compartida con otro sistema PON, por ejemplo un GPON, según se ilustra en la Figura 42.

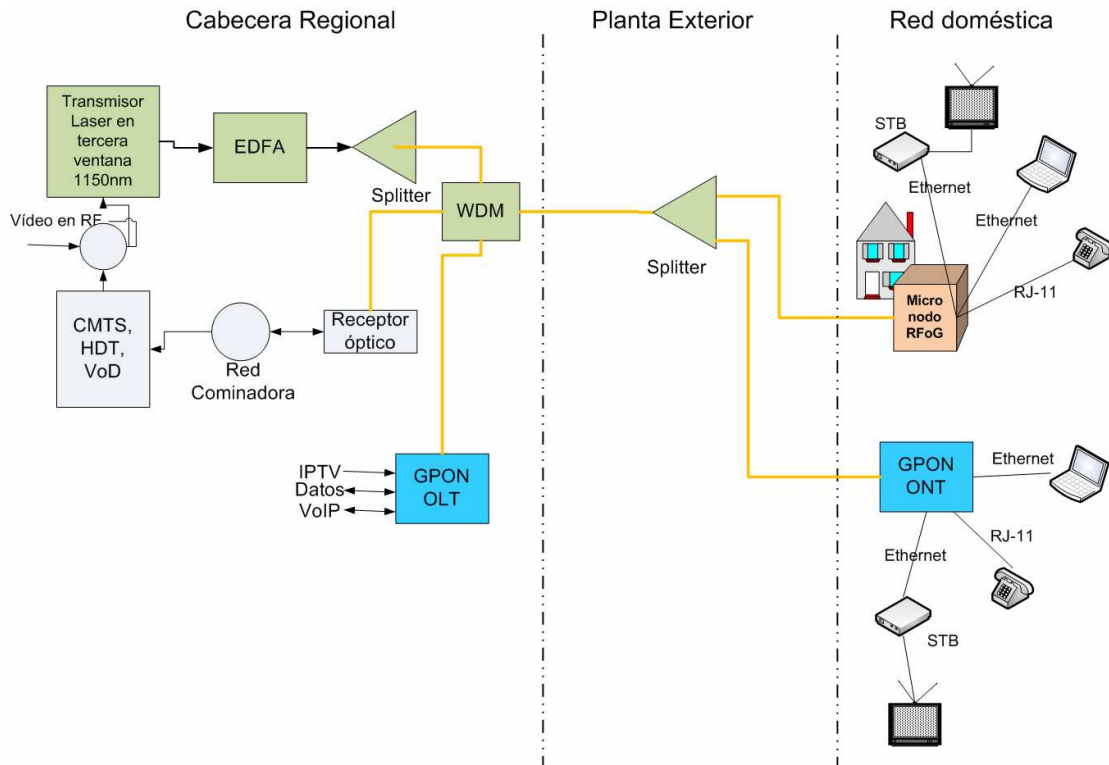


Figura 42. Utilización conjunta de la red de distribución óptica por un operador que utiliza RFoG y un sistema GPON

2.3.2.3 Elementos de red

En el caso de Ethernet Activa los elementos de red son básicamente:

- Conmutadores Ethernet con circuitos de terminación que cumplan la capa física del 802.3ah.
- Lo mismo es aplicable a los equipos de terminación en casa del usuario, donde podemos encontrar una variedad de interfaces y funciones integradas hacia el interior de los locales del usuario, que incluyen desde puertos Ethernet metálicos e incluso ópticos, Wi-Fi, decodificadores de IPTV integrados, etc.

En el caso de los sistemas GPON los elementos de red son:

- La OLT o equipo de central está basada en la utilización de los IP DSLAM utilizados en las tecnologías DSL, sustituyendo las tarjetas de interfaz DSL por tarjetas OLT GPON. Cada tarjeta podrá soportar varios GPON, que al multiplicar por el factor de división aumenta la capacidad de usuarios por tarjeta, por ejemplo 4 GPON/tarjeta x división de 32 hace un total de 128 usuarios por tarjeta, aunque estas son cifras teóricas.

- Las ONT del lado del usuario, que en contraposición con la simplicidad de las terminaciones de usuario en el caso de Ethernet Activa, aquí estas tarjetas tienen que realizar el control de Acceso al Medio propio de una tecnología de acceso compartido y todas las funciones asociadas:
 - Ajustes iniciales y periódicos de retrasos
 - Ajustes iniciales y periódicos de niveles de potencia
 - Notificación de conexión de ONT al PON
 - Cifrado

Los interfaces hacia los locales del usuario presentan la misma variedad que en el caso de Ethernet Activa. Todo ello hace que intrínsecamente las ONTs GPON sean más complejas que las de Ethernet Activa, lo cual desde un punto de vista teórico debía traducirse en un coste mayor. Aunque la producción en volumen puede desvanecer rápidamente cualquier ventaja en coste basada simplemente en la complejidad.

En lo referente a la red metropolitana, es decir, desde las OLT hasta los centros de interconexión interurbano, la red tiene la misma arquitectura, en realidad es la misma, que la utilizada en nuevas redes de acceso xDSL basadas en IP-DSLAM, de hecho el nodo es el mismo, y básicamente consiste en una red de agregación Ethernet con funciones para soportar servicios como IPTV de calidad. Ver Figura 43.

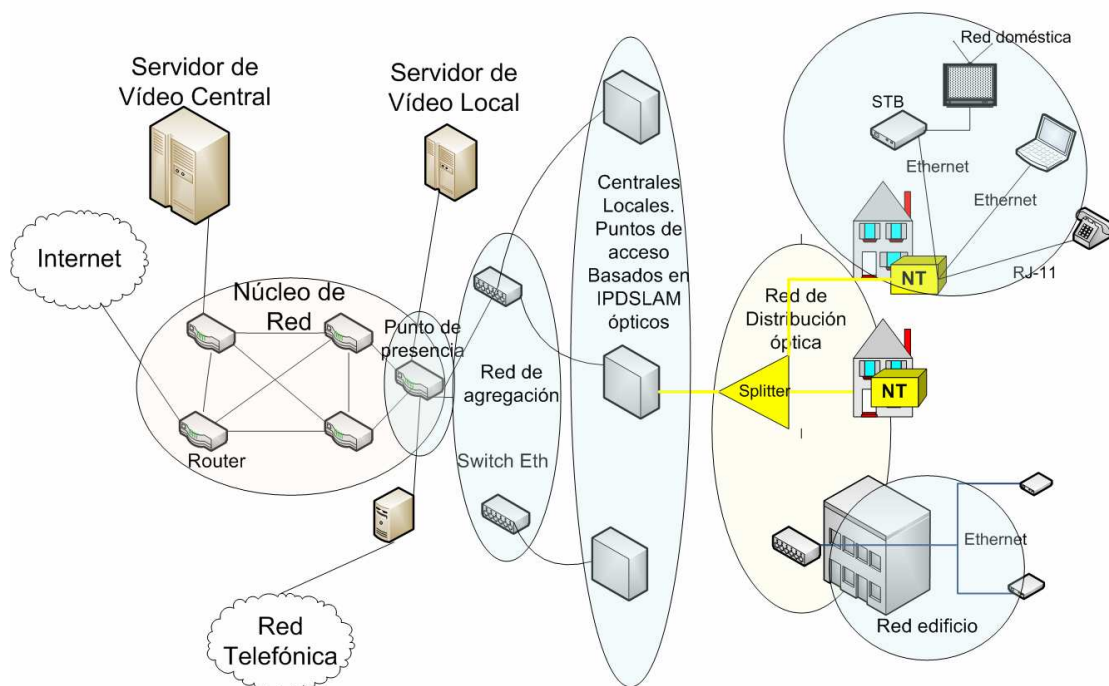


Figura 43. Red de acceso para FTTx

Recordando alguna de las características de esta red metropolitana, ya vistas en los accesos DSL:

- IP/Ethernet es el mecanismo de transporte nativo del acceso
- El DSLAM es un IP-DSLAM, con funciones de conmutador Ethernet, *router* IP, y funciones de *multicast* IP, *IGMP snooping* para control rápido del cambio de canal.
- La red de agregación de tráfico de acceso está implementada con conmutadores Ethernet, MPLS o VPLS.
- Los IP-DSLAM se convierten en nodos que soportan accesos DSL y de fibra.
- Los DSLAM ofrecen interfaces Gigabit Ethernet hacia la red y proporcionan mucho mayor ancho de banda, ya que los servicios de vídeo no permiten grandes ganancias estadísticas al multiplexar el tráfico.
- Los servicios de vídeo requieren prestaciones adicionales en la red: por ejemplo para soportar el *Instant Channel Change*.
- Para los servicios de vídeo por usuario Vídeo bajo Demanda (VoD), Grabación de Vídeo Personal (PVR), TV retrasada, etc. la optimización de la utilización de recursos de red se basa en una distribución de servidores de contenido en las distintas capas de red, de forma que los contenidos más demandados se encuentren más próximos a los usuarios demandantes.

2.3.3 Madurez de la tecnología y del mercado

2.3.3.1 Tecnología

Haciendo abstracción de las tecnologías de acceso fibra que hemos considerado superadas, aunque están desplegadas en planta, como ESCON, FICON, SDH en acceso y otras tecnologías propietarias, en la actualidad podemos considerar tres tecnologías suficientemente maduras y que están siendo desplegadas de forma comercial en las redes:

- Ethernet Activa: proviene del esfuerzo de estandarización del grupo del IEEE 802.3ah y ha sido desplegada por operadores en Asia, Europa y parcialmente en Norteamérica. Es una tecnología que goza en gran medida de la madurez de la Ethernet en área local y se beneficia de la familiaridad de los técnicos con esta tecnología. Además ha sido estandarizada antes que su mayor competidor, GPON, con lo cual algunos operadores como SureWest en Sacramento California la han elegido por razones de disponibilidad. Además la elección puede considerarse de bajo riesgo tecnológico, aunque requiere una importante inversión tanto en fibra como en equipo de central, ya que puede proporcionar una gran capacidad por usuario desde los momentos iniciales, puede coexistir en el mismo despliegue e incluso la infraestructura de fibra puede reconvertirse a una arquitectura GPON mediante la instalación de los divisores en la central, y cambiando los equipos.

- GEPON (también llamado EPON ó IEEE 802.3 Ethernet PON): como indicamos en el apartado anterior esta tecnología está sobre todo respaldada por los once millones de usuarios existentes en Japón debido al impulso (¿político?) de NTT. Esto hace que en la actualidad esta tecnología haya alcanzado efectos de volumen en sus costes. Cabe señalar que Japón, y en cierta medida EE.UU. presentan escenarios que favorecen nuevos despliegues de acceso fibra por estar muy extendida la planta exterior aérea.
- GPON (UIT-T G.984): es la tecnología en la actualidad más respaldada por los grandes suministradores y muchos operadores en EE.UU. y Europa (Telefónica entre ellos), presenta además mayor capacidad que el GEPON, 2,5 Gbit/s frente a 1 Gbit/s en la dirección hacia el usuario. Los factores de división, tanto teóricos como prácticos también son mayores en GPON que en GEPON.

Por volúmenes alcanzados podemos afirmar que se trata de tres tecnologías maduras. No obstante podemos estar ante uno de los conocidos “efecto sándwich” tecnológicos:

- Por un lado nos encontramos que la demanda de servicios por parte de los usuarios se encuentra en un punto que podemos considerar cubierta por las tecnologías actuales: cable, satélite, xDSL, TDT, o combinaciones de las mismas. Sólo la aparición de nuevos contenidos que requieren más capacidad de transporte o más simetría se prevén como los impulsores del despliegue de la fibra hasta la casa del usuario. En EE.UU. al parecer está surgiendo la demanda de TV en Alta Definición con fuerza, que al menos requiere la penetración de la fibra hasta la acera o el edificio con la acometida en VDSL. El siguiente paso en la demanda lo constituye la TV en tres dimensiones con efectos de inmersión en la escena. Mientras la TV en Alta Definición es una realidad actual la escasa disponibilidad de contenidos así como de terminales capaces hace que la demanda aún no sea importante.
- Por otro lado, y apenas alcanzada la madurez tecnológica por los sistemas en despliegue ya están en marcha los esfuerzos de estandarización, y a buen ritmo de las tecnologías siguientes que suponen un salto de un orden de magnitud o dos en capacidad:
 - 10 Gbit/s EPON ó XEPON: los trabajos de estandarización están a cargo del *Task Force* del IEEE 802.3av. PCM Sierra ofrece en la actualidad chips para realizar diseños de referencia de OLT y ONT de este estándar.
 - El otro bando, es decir la UIT-T, también está en proceso de estandarización de un 10 Gbit/s GPON. Este estándar está respaldado por los grandes fabricantes clásicos: Ericsson, Alcatel-Lucent, Motorola. Se prevé que los primeros equipos estarán disponibles en 2010 (Motorola lo anuncia para 2009) con despliegues en 2011.

- WDM-PON: sistemas con típicamente hasta 32 lambdas, con el objetivo potencial de dotar a cada usuario de una lambda. También se propone una utilización conjunta con lambdas dedicadas a usuarios y otras soportando sistemas PON.
- Otra tecnología que lleva años en investigación es la de introducir amplificación óptica en el PON¹⁵, de forma que se pueda incrementar tanto el alcance como el factor de división. Las cifras que se barajan son 100 km y cientos de usuarios.

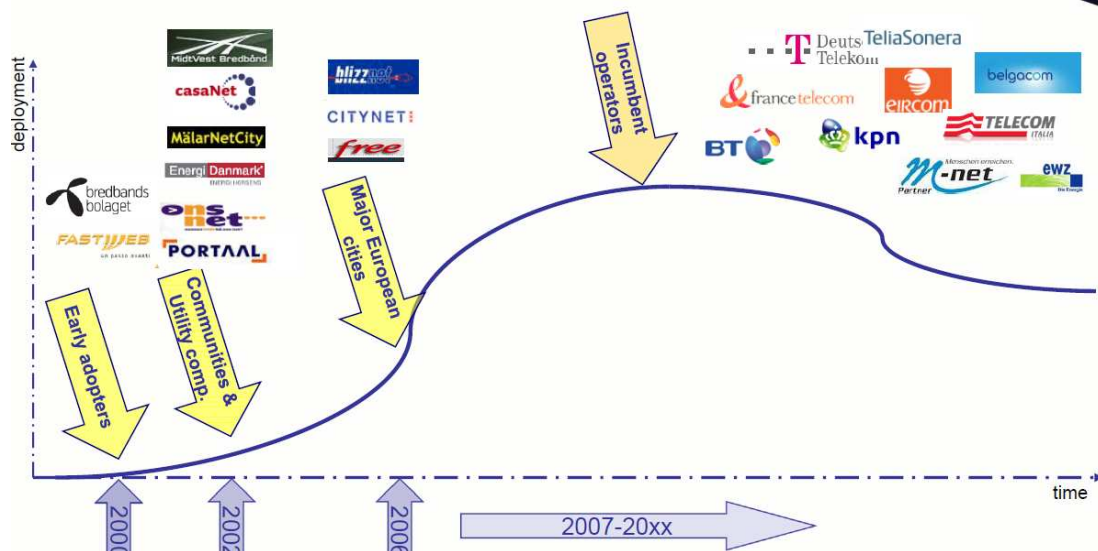
Al efecto sándwich tecnológico se añade además el efecto de velocidad de despliegue y recuperación de la inversión, conceptos que van ligados. Según estimaciones de McKinsey & Company un despliegue de fibra hasta la acera, con la acometida final en VDSL2 tardaría unos cuatro años en cubrir el 80% de los usuarios de un mercado objetivo en escenario europeo; un despliegue de FTTH en el mismo escenario y tiempo cubriría un 20%.

2.3.3.2 Mercado

Desde un punto de vista de despliegue, como decíamos en la introducción, en el mundo existen unos 20 millones de acceso de fibra hasta los usuarios. Los cuales se concentran en Japón con 11 millones (Tecnología GEPON); en EE.UU., concretamente con Verizon y su FiOS (mayoritariamente tecnología BPON evolucionando a GPON) con 10 millones de hogares pasados en junio de 2008, con 1,8 millones conectados al servicio FiOS Internet y 1,2 millones a FiOS Video/TV; AT&T también apuesta por la penetración de fibra pero hasta la acera y acometida VDSL2; en Suecia el despliegue ha sido a cargo de los ayuntamientos, compañías eléctricas y operadores alternativos, llegando a 500.000 conexiones; TeliaSonera tiene planes de alcanzar dos millones de usuarios (¿o hogares pasados?) en un plan a cinco años. Corea del Sur tiene un gran despliegue de fibra, pero su demografía, agrupaciones urbanas en grandes edificios hace que la arquitectura de acceso sea FTTB, análoga consideración para Hong Kong y Taiwan. Si hacemos un repaso a otros países principales nos encontramos que en Francia existen tres operadores alternativos y France Telecom (FT) desplegando fibra en París, FT estima que a finales de este año 2008 tendrá un millón de hogares pasados en París y otras ciudades principales. En Alemania, Deutsche Telekom y ayuntamientos están desplegando fibra.

Es de notar el papel que intentan jugar los ayuntamientos y otras administraciones regionales. La idea subyacente consiste en considerar el despliegue de fibra como una infraestructura pública, necesaria para el desarrollo de la comunidad, y por tanto con unos plazos de amortización muy superiores a los que se obtienen en el negocio de los servicios de telecomunicación. La idea sería proporcionar infraestructura de fibra y ponerla a disposición de los operadores de servicio a unos precios ajustados dado el objetivo de amortización a largo plazo.

Una asociación para promocionar los despliegues de FTTH es el Fiber-to-the-Home Council [27], con numerosas organizaciones municipales y regionales asociadas, amén de los principales suministradores de estas tecnología. De esta fuente tomamos la Figura 44 que tiene el interés de señalar el *road map* de utilización de las tecnologías FTTH por los distintos tipos de actores.



Fuente: presentación del FTTH Council Europe, 20 enero 2008

Figura 44. Penetración de tecnologías FTTH en Europa y protagonistas en cada etapa

En cuanto a los suministradores de equipos OLT (ver Tabla 16) nos encontramos por un lado los grandes suministradores clásicos (Alcatel-Lucent, Ericsson, Nokia Siemens, ECI, Adtran, etc.), incluyendo ahora los suministradores chinos (Huawei, ZTE) y algunos especialistas (Alphion, Enablence).

Tabla 16. Suministradores de OLT

Empresa	Familia equipo
Adtran	Total Access 5000
Alcatel-Lucent	7342 P-OLT
Alloptic	Edge 2000/Edge 200 (GEPON) Edge10 (10 Gbit/s?), RFoG (WDM)
Alphion	AOLT-4000
Calix	F5 GPON OLT, C7 GPON OLT
ECI Telecom	Hi-FOCuS MSAN
Enablence (Wave 7)	Trident 7 OLT
Ericsson	EDA 1500
Huawei	SmartAX MA5600T

Hitachi Telecom	AMN1220 OLT
LS Cable	LST 9616 IMBA Series
Motorola	AXS2200
NEC	AM3100 Series MSAN
Nokia Siemens	SURPASS hiX 5750*
Nortel	Ethernet Access Service Terminal 1100 (WDM PON)
Occam	6322
Tellabs	1150 MSAP
UTStarcom	BBS 4000, BBS 1000+(GEAPON)
Zhone	MALC OLT
ZTE	ZXA10 C220

Una tabla análoga para suministradores de ONT con sus características más destacadas se puede ver en la Tabla 17.

Es de resaltar que las empresas que aparecen en la Tabla 16 y en la Tabla 17 son las mismas con la excepción de TXP. Es decir, los suministradores proveen los dos extremos del sistema, situación similar a lo ocurrido al comienzo del despliegue de los sistemas DSL y que viene determinada por el escaso volumen del mercado en la actualidad que hace que los equipos de usuario aún no hayan alcanzado el nivel de *commodity*.

Tabla 17. Suministradores de ONT con sus características

Empresa	Línea de Producto	SFUs	MDUs	IPTV	RF Video	Puertos POTS	Giga Eth.
Adtran	Total Access 300	x		x	x	2	x
Alcatel-Lucent	7342 ONT	x	x	x	x	4	x
Alloptic	HomeGateway 300/400; Xgen1000/5000/6000/7500/8000/9000	X	X	X	X	1/T1	x
Calix	710/710G, 720/720G, 740/740G, and 760/760G	x	x	x	x	8	x
ECI Telecom	B-FOCuS ONT	x		x	x	2	x
Enablence (Wave7)	G-1000i, G-1300i, G-221, and G-888	x	x	x	x	8	x
Ericsson	EDA 1500	x	x	x	x	2	x
Hitachi Telecom	AMN1220 GST/GMT	x	x	x	x	6	x
Huawei	EchoLife HG850	x		x	x	2	x
LS Cable	LST Series	x	x	x	x	2 o 4	x
Motorola	1000GT2, 1500GT, and 6000GVT	x	x	x	x	2	x

NEC	ME200 Series ONT	x	x	x	x	2	x
Nokia Siemens	SURPASS hiX 570x**	x	x	x	x	2	x
Nortel	Ethernet Access Busines Unit 1111/1112, Residential Unit 1112/1102	x	x	x	x	-	x
Occam	2440	x	x	x	x	2	x
Tellabs	1600-70X	x		x	x	2	x
TXP	7200, 7300, and 7500	x		x	x	4	x
UTStarcom	ONU101i, ONU204i, ONU404i, ONU804i, ONU1001i, ONU2004i, ONU208i,ONU2024i	x		x	x	-	x
Zhone	zNID	x		x	x	2	x
ZTE	ZXA10	x	x		x	2	x

Fuente: www.lightreading.com

2.3.4 Prestaciones

Resumiendo las prestaciones de las arquitecturas de fibra hasta los locales del usuario:

1. capacidad casi ilimitada;
2. bajas pérdidas de transmisión que implican gran alcance y posibilidad de división de potencia;
3. pequeño diámetro y peso, lo que facilita muchos aspectos importantes de su despliegue en planta;
4. resistencia a las agresiones del entorno: penetración de agua, rayos, interferencias electromagnéticas;
5. no limitada por diafonía entre fibras;
6. difícil de “pinchar”;
7. potencial de coste reducido que aún está por materializarse.

Los factores que están ralentizando la introducción de la fibra en las redes de acceso son:

- El coste. Los componentes electroópticos de las terminaciones de usuario y de central, diplexores o triplexores, siguen constituyendo un coste apreciable del coste total del sistema.
- Frente a su principal competidor, el par de cobre, compiten contra una planta ya desplegada, que si bien no alcanza las prestaciones que la fibra hasta el usuario presenta, está siendo suficiente para la demanda actual de los servicios por parte de los usuarios.

2.3.5 Adecuación a los servicios considerados

Como hemos ido viendo a lo largo del presente capítulo las tecnologías FTTH actuales (~ 1 Gbit/s compartido lo que viene a resultar en 100 Mbit/s) y futuras un orden de magnitud superior están orientadas a cubrir todos los servicios previstos y futuros del *triple play*, incluyendo en la evolución los servicios de TV de Alta Definición a corto plazo y TV tridimensional a medio largo plazo. Resumiendo: FTTH es el objetivo último de evolución de las tecnologías de acceso fijo, ya sean provenientes de la evolución de las redes DSL o de las redes HFC.

Tabla 18. Adecuación de las tecnologías FTTH a los servicios considerados.

Servicio	Soporte en FTTH
Telefonía	Soporte total. La capacidad requerida resulta marginal respecto a la capacidad disponible. Los sistemas PON y punto a punto proveen las clases de calidad de servicio requeridas.
Streaming	Soporte total. Los sistemas proporcionan las capacidades requeridas y son capaces de asignar las clases de calidad de servicio que se decidan en la coexistencia con otros servicios de forma que la calidad de la reproducción de <i>streaming</i> puede adecuarse a la máxima del contenido.
Descarga entre pares (<i>Peer to peer</i>)	Soporte total.
Juegos en red	Soporte total. Incluso en sistemas PON que introducen latencia por la contención de acceso al medio en la dirección usuario red, esta está limitada por debajo de 2,5ms.
Distribución de TV	Soporte total. En el diseño de las arquitecturas de acceso y agregación esta aplicación es un objetivo prioritario. Las prestaciones son similares a los sistemas HFC con canales digitales.
Vídeo bajo demanda	Adecuado con las mismas consideraciones del servicio de distribución de TV.

A la hora de traducir las capacidades de los sistemas PON en capacidad de servicio por usuario podemos realizar unos cálculos grosso modo:

- Un sistema GPON de 2,5 Gbit/s de bajada y un factor de división de 32 nos proporcionan más de 70 Mbit/s brutos por usuario normalmente la oferta comercial sería de 50 Mbit/s. Las necesidades de servicio típicas (ver Figura 35) podrían ser de 3 canales de TV estándar (2,3 Mbit/s por canal), 1 canal de TV Alta Definición (9,3 Mbit/s), Acceso a Internet de Alta Velocidad (5 Mbit/s) y VoIP (160 kbit/s); esto daría un total de 21,4 Mbit/s, es decir la mitad de una oferta conservadora, máxime si se tiene en cuenta que los factores de división reales, por motivos de ingeniería de planta y distribución de la demanda no llegan a los 32 usuarios por PON. Una consideración análoga podría realizarse para GEPON que llegaría a más de 30 Mbit/s, capacidad suficiente para los niveles de servicio considerados.

- En cuanto a la calidad de servicio, número de aberraciones de imagen por hora la transmisión por fibra haría que la pérdida de paquetes se redujera varios órdenes de magnitud con respecto a las cifras que se obtienen en la transmisión por cobre, con lo que los mecanismos de protección frente a errores podrán ser más ligeros y consecuentemente la eficiencia del transporte aumentaría.
- En cambio los problemas de retardo al cambiar de canal (zapeo) no tienen relación con el sistema de transporte, y sí con el sistema de codificación de fuente, con lo que la situación permanecería como en los sistemas de IPTV actuales. Sin embargo, cabe pensar si con las nuevas generaciones de acceso con fibra que aumentan la capacidad varios órdenes de magnitud podría pensarse en sistemas de codificación de fuente menos potentes, es decir, con un factor de compresión menor, que introdujeran menores retardos en la codificación y en el cambio de canal.

2.3.6 Aspectos regulatorios y de normalización

Desde un punto de vista de normalización el grupo Full Service Access Network (FSAN) de la UIT-T y el IEEE han elaborado una serie de estándares para redes ópticas pasivas, recogidos en la Tabla 19. Cabe señalar también las labores de promoción de las tecnologías FTTH desarrolladas por el Fiber to the Home Council [27], formado en el 2001 por diferentes empresas (operadores, fabricantes, desarrolladores de aplicaciones, proveedores de contenidos, etc.) con sus ramas americana, europea y Asia-Pacífico.

Tabla 19. Estándares de redes ópticas pasivas de UIT-T (FSAN) y de IEEE

Grupo Full Service Access Network (FSAN) de la UIT-T	
G.983.1	Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas
G.983.2	Especificación de la interfaz de control y gestión de terminales de red óptica (ONT) para redes ópticas pasivas de banda ancha (B-PON)
G.983.3	Sistema de acceso óptico de banda ancha con capacidad de servicio incrementada mediante la asignación de longitud de onda
G.983.4	Sistema de acceso óptico de banda ancha con asignación dinámica de anchura de banda para aumentar la capacidad de servicio
G.983.5	Sistema de acceso óptico de banda ancha con mayor capacidad de supervivencia
<u>G.984.1</u>	Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits (GPON): Características generales
<u>G.984.2</u>	Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits (GPON): Especificación de la capa dependiente de los medios físicos (PMD)
<u>G.984.3</u>	Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits (GPON): Especificación de la capa de convergencia de transmisión
<u>G.984.4</u>	Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits (GPON): Especificación de la interfaz de control y gestión de la terminación de red óptica (ONT)

<u>G.984.5</u>	Banda de ampliación de las redes de acceso óptico con capacidad de gigabits
<u>G.984.6</u>	Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits (GPON): Extensión del alcance
<u>G.Imp984.3</u>	Guía para implementadores de UIT-T Rec. G.984.3 (02/2004)
IEEE	
IEEE 802.3ah	<i>Ethernet in the First Mile</i> : GEAPON, Fibra punto a punto y EFM sobre cobre
IEEE 802.3av	10 Gb/s Ethernet PON (trabajo en curso)

En cuanto a la regulación al ser los despliegues de fibra en cierta medida nueva planta desplegada se plantea el problema de si obligar al operador dominante en un cierto ámbito a desagregar la fibra instalada, a un precio orientado al coste, con lo que se potencia la entrada de nuevos operadores a ofrecer los nuevos servicios de banda ancha. Esta aproximación en principio desincentivaría la inversión en nueva planta del operador dominante, aunque por otra parte es la que produce una más eficiente inversión en infraestructura. Otra aproximación consiste en no autorizar la desagregación de la fibra instalada, al menos de forma temporal, de forma que el operador que invierta asegure un período en el que puede recuperar su inversión, antes de que la competencia acceda a la infraestructura desplegada. Esta aproximación es la que se sigue en EE.UU.

En la actualidad en España la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones ha optado por:

- Garantizar a los operadores alternativos la posibilidad de replicar, en todo el territorio nacional y mediante un servicio mayorista de acceso indirecto (*bitstream*), las ofertas minoristas de Telefónica con una velocidad de acceso a Internet igual o inferior a 30 Mbits/s. La CMT apuesta así por un modelo que cumple con el principio de neutralidad tecnológica, al estar centrado en las velocidades de acceso a Internet y establecer obligaciones sin tener en cuenta la tecnología que soporta los servicios (cobre o fibra).
- De acuerdo con la recomendación de la Comisión Europea, la CMT propone no considerar parte del mercado de referencia las velocidades superiores a 30 Mbits/s.
- La CMT también propone imponer a Telefónica la obligación de compartir sus infraestructuras de obra civil y mantener la regulación sobre el bucle del abonado, con el fin de incentivar la competencia en redes y, a su vez, garantizar las inversiones llevadas a cabo hasta ahora por los distintos operadores. Asimismo, advierte de que Telefónica no puede modificar la estructura de su red de cobre sin autorización del regulador y la comunicación previa a sus competidores.
- En relación con el acceso físico a redes de nueva generación y a cualquiera de sus arquitecturas (fibra hasta el hogar o hasta un nodo), la CMT ha constatado que la desagregación de la fibra no es factible. En este sentido, y con el objetivo de fomentar la inversión y la competencia en infraestructuras,

obligará a Telefónica a proporcionar acceso a sus infraestructuras de obra civil (cámaras, arquetas, canalizaciones, postes y conductos) con precios orientados a costes.

- La obligación de la apertura de conductos es proporcionada, ya que Telefónica, para sus despliegues NGaN (*Next Generation Access Network*), cuenta con toda la infraestructura creada en la época de monopolio. La duplicación de la red para un operador que iniciara su despliegue supondría una importante barrera de entrada al mercado, con unos costes de entre el 50 y el 80% de la inversión total. En los casos en los que el acceso a los conductos no fuera factible (problemas técnicos o de espacio), la CMT, en línea con la recomendación de la CE, obligará a Telefónica a ofrecer otras soluciones a los operadores alternativos, como la fibra oscura.
- La CMT también aborda el cuello de botella que para la extensión de nuevas redes representa el interior de los edificios. En este sentido, la CMT destaca que está trabajando en una regulación que obligará a todos los operadores a compartir las redes de nueva generación tendidas en el interior de las edificaciones.
- En el análisis de los mercados mayoristas de banda ancha, la CMT no ha encontrado mercados inferiores al nacional, aunque sí ha identificado dos zonas con diferentes presiones competitivas sobre el incumbente. En estas zonas, la CMT propone fijar obligaciones distintas según al grado de competencia existente.

2.3.7 Escalabilidad

Los despliegues de fibra hasta el usuario sufren en el momento actual de dos barreras que dificultan su despliegue masivo:

- El coste del despliegue físico de la fibra en la planta exterior. En este caso se pueden dar múltiple escenarios:
 - *Green Field*: despliegue totalmente nuevo, en cuyo caso el coste de la obra civil es análogo para el cobre y para la fibra, quizá con una pequeña ventaja a favor de la fibra.
 - *Brown Field*: en este caso existe infraestructura desplegada de cobre. En el caso de planta enterrada el problema se traduce en la disponibilidad o no de ductos libres. Otro caso es el tendido aéreo, donde la instalación suele ser mucho más económica y rápida. Este factor, a nuestro juicio es uno de los determinantes de los despliegues de fibra en Japón donde la mayor parte de la planta exterior es aérea incluso en las zonas urbanas.

FTTH sufre en cualquier caso, como todo despliegue de red fija de acceso guiado, el problema de requerir una inversión inicial sustancial para “pasar” hogares, independiente de la tasa de usuarios conectados y de su velocidad de suscripción a los servicios ofrecidos.

- La segunda barrera que se encuentra el despliegue sigue siendo el coste de las ONT (y en los sistemas Ethernet Activa de las OLT) determinado por el coste de los conversores electro-ópticos (diplexores o triplexores) que siguen representando una parte importante del coste de los equipos de abonados. A esto cabe añadir que en los servicios *triple play* sobre red óptica, en telefonía hay que cumplir con el requisito de *Life Line*, es decir, que incluso en caso de ausencia de suministro eléctrico en el domicilio del usuario se debe mantener el servicio telefónico básico, lo cual requiere la inclusión de baterías de respaldo en el domicilio del usuario.

2.3.7.1 Costes de operación, mantenimiento y crecimiento

Una de las “virtudes” de los despliegues de fibra hasta casa del usuario reside en que la planta exterior, fibras más divisores, es además de totalmente pasiva, resistente hasta cierto punto a condiciones ambientales de humedad y temperatura. Todo ello hace que el mantenimiento de planta exterior se reduzca.

Por el contrario, y sobre todo en los sistemas PON, el equipo de usuario es activo y “complejo” hasta cierto punto. Aunque los sistemas PON tienen procedimientos automáticos de ajuste y autoconfiguración. En nuestro conocimiento, en la actualidad los equipos de los sistemas PON son realizados por personal del operador desplazado a casa del usuario, aunque vemos factible que en un futuro la autoinstalación por parte del usuario sea factible. En los sistemas punto a punto, equipos Ethernet de “largo” alcance, estas consideraciones no son aplicables.

Las redes de fibra hasta el usuario tienen el problema de planificación y predicción de la demanda de cualquier infraestructura de red fija, es decir hay que planificar los tendidos de fibra para que puedan hacer frente al crecimiento del número de usuarios en un período determinado. Hacemos notar que sí poseen la flexibilidad intrínseca para hacer frente a aumentos de la capacidad por usuario para hacer frente a la introducción de servicios más exigentes, es decir pasar de 2,5 a 10 o incluso a multiplexación por división en λ .

2.3.8 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Puesto que normalmente el tendido de fibra óptica se hace de manera subterránea, o sobre tendido aéreo preexistente, este tipo de tecnologías de acceso no causan impacto medioambiental, ni ningún tipo de radiación o emisión hacia el exterior. Los equipos ópticos asociados a las instalaciones FTTH suelen ubicarse en el interior de los locales del usuario con condiciones ambientales controladas. En consecuencia, las condiciones meteorológicas no tienen ninguna incidencia sobre los equipos.

2.4 Redes IEEE 802.16/WiMAX

2.4.1 Motivación original y evolución

Las tecnologías IEEE 802.16/WiMAX se encuadran dentro de la familia de soluciones para proporcionar acceso de banda ancha sin hilos en la última milla. Sus antecedentes más cercanos son los servicios LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*) y MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*), comercializados con relativo éxito en la década de los 90, en pleno auge de Internet.

Una de las principales ventajas de estos sistemas frente a las alternativas cableadas es su facilidad de despliegue al no requerir el tendido de infraestructuras físicas de transmisión hasta las instalaciones de abonado. Al correspondiente ahorro económico que esto conlleva, ha de sumarse la agilidad que supone el alta de nuevos abonados.

Planteados como alternativa rápida y económica para el despliegue de bucles de banda ancha en entornos empresariales, el principal inconveniente de los servicios LMDS y MMDS es que se basaban en soluciones propietarias. En este contexto, en el año 2001 surge la primera versión del estándar IEEE 802.16 [28], con objeto de definir un interfaz normalizado para redes de acceso inalámbrico de banda ancha en entornos metropolitanos.

Actualmente, es frecuente utilizar las denominaciones WiMAX e IEEE 802.16 de manera indistinta. No obstante, existen matices diferenciadores importantes entre ambos términos. Como se ha indicado, el estándar IEEE 802.16 define una solución normalizada de acceso inalámbrico de banda ancha. Por su parte, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es un programa respaldado por un foro industrial, el WiMAX Forum [29], para promover la certificación e interoperabilidad de equipos y sistemas basados en determinados subconjuntos (perfiles) del estándar IEEE 802.16.

Desde la primera versión, el estándar IEEE 802.16 ha experimentado una serie de revisiones que han traído consigo la mejora de prestaciones y el soporte de nuevas funcionalidades, ampliándose sustancialmente los escenarios de aplicación, tal como se ilustra en la Figura 45.

En un principio, el estándar IEEE 802.16 se orientaba a proporcionar accesos fijos en configuraciones punto a punto o punto a multipunto. En el primer caso, el empleo de IEEE 802.16 se convierte en una alternativa más para el despliegue de radioenlaces, abarcando los diversos escenarios de aplicación típicos de éstos como, por ejemplo, para la interconexión de estaciones base de un sistema celular.

Las configuraciones punto a multipunto del estándar IEEE 802.16 permiten dar acceso a múltiples abonados fijos con una sola estación base. La versión inicial del estándar exigía visión directa (LOS), por lo que los abonados debían disponer de una unidad exterior debidamente apuntada hacia la estación base. Gracias a las

mejoras introducidas en las enmiendas al estándar original y en la versión de 2004 [30] (IEEE 802.16-2004), es posible dar servicio sin necesidad de visión directa (NLOS), relajándose los requisitos de apuntamiento. De este modo, es posible la instalación de la unidad de abonado, con ciertas limitaciones, dentro del edificio. Así mismo, se permite una movilidad restringida del terminal dentro de la zona de cobertura de la estación base.

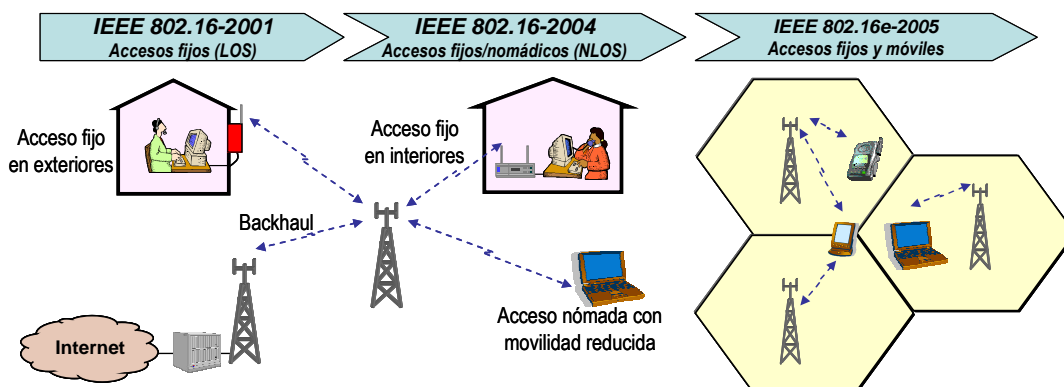


Figura 45. Ámbitos de aplicación del estándar IEEE 802.16

La revisión IEEE 802.16-2004 [30], que deja obsoletas a las versiones anteriores, es precisamente el punto de partida de la tecnología WiMAX. Basándose en dicha versión del estándar, el WiMAX Forum llevó a cabo la definición de un primer conjunto de perfiles de certificación para equipos WiMAX Fijos.

La evolución de la familia de estándares IEEE 802.16 dio lugar en diciembre de 2005 a la enmienda IEEE 802.16e [31] que incorpora el soporte de movilidad (hasta 120 km/h) y traspasos entre estaciones base. De este modo, se posibilita el empleo de la tecnología IEEE 802.16 para el despliegue de sistemas de comunicaciones móviles celulares. En base a dicha enmienda, el WiMAX Forum llevó a cabo la definición en 2006 de un nuevo perfil WiMAX, denominado *Mobile WiMAX*.

En la Tabla 20 se resumen las principales características de los estándares IEEE 802.16 definidos hasta la fecha. En el apartado 2.4.2 se analizan con más detalle las características de las distintas versiones y revisiones del estándar IEEE 802.16.

A día de hoy, la evolución de la familia de estándares IEEE 802.16/WiMAX continúa. Entre las mejoras previstas cabe destacar la enmienda IEEE 802.16j [32] (cuya ratificación está prevista en 2009), que permite el empleo de estaciones repetidoras, fijas o móviles, para mejorar el alcance en zonas de cobertura limitada (por ejemplo, en los bordes de una célula o en zonas de sombra). A más largo plazo, se está trabajando en el futuro estándar IEEE 802.16m, cuyo objetivo fundamental es incrementar de manera significativa las tasas de bit con respecto a sus predecesores. Las metas que se han marcado son ambiciosas: hasta 100 Mbit/s en movilidad y hasta 1 Gbit/s para acceso fijo. Estas capacidades están en consonancia con las previstas en la evolución de los actuales sistemas de comunicaciones móviles celulares (por ejemplo, LTE del 3GPP). El IEEE afirma que tendrá lista la

especificación en 2009. Por su parte, el WiMAX Forum ya ha previsto un nuevo perfil basado en la enmienda IEEE 802.16m denominado “WiMAX 2.0”.

Tabla 20. Características de los estándares IEEE 802.16

	IEEE 802.16-2001	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e
Fecha de publicación	Diciembre 2001	Octubre 2004	Diciembre 2005
Banda de operación	10-66 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz
Visión directa	Sí (LOS)	No (NLOS)	No (NLOS)
Ancho de banda por canal	20, 25 y 28 MHz	Variable entre 1,5 MHz y 20 MHz	Variable entre 1,5 MHz y 20 MHz
Tasas de bit	32-134 Mbit/s (canales de 28 MHz)	hasta 75 Mbit/s (canales de 20 MHz)	hasta 15 Mbit/s (canales de 5 MHz)
Modulación	QPSK/16QAM/ 64QAM	OFDM 256/ OFDMA 2048 QPSK/16QAM/64QAM	OFDM 256/ OFDMA 2048 QPSK/16QAM/64QAM
Movilidad	Acceso fijo	Acceso fijo o portable	Acceso móvil
Rádio de célula típico	1,5 - 5 km	5 - 8 km (máx 50 km)	1,5 - 5 km

2.4.2 Normalización

2.4.2.1 Estándar IEEE 802.16

El estándar IEEE 802.16 forma parte de la familia de estándares IEEE 802 para redes locales y metropolitanas, y, más específicamente, de la rama de soluciones basadas en tecnologías inalámbricas, ilustrada en la Figura 46.

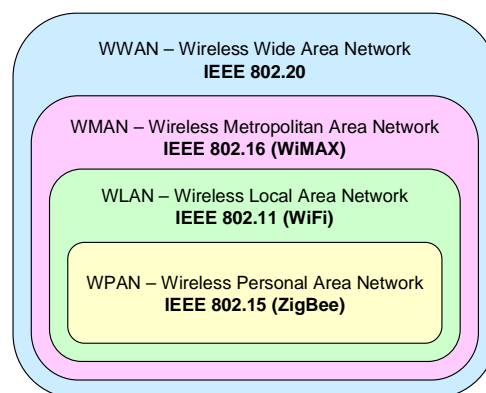


Figura 46. Familias de estándares IEEE para redes inalámbricas

El comité de estandarización IEEE 802 ha desarrollado estándares de acceso para redes inalámbricas con distintos rangos de cobertura: IEEE 802.15 para redes de área personal (WPAN), IEEE 802.11 para redes de área local (WLANs), IEEE 802.16 para redes de área metropolitana (WMAN), y IEEE 802.20 para redes de área extensa (WWAN). En el caso que nos ocupa, el estándar IEEE 802.16, la responsabilidad recae en el grupo de trabajo *Broadband Wireless Access* del comité IEEE 802.

En sentido estricto, solamente existe un estándar IEEE 802.16. Sin embargo, el proceso de definición del estándar a lo largo de los años ha dado lugar a la consideración de diversas versiones, enmiendas, correcciones y revisiones. Algunas de las versiones iniciales han quedado obsoletas, al tiempo que actualmente se discuten nuevas enmiendas tratando de mejorar las actualmente vigentes.

En la Tabla 21 se resume el estado de normalización de las distintas versiones o enmiendas del estándar IEEE 802.16.

Tabla 21. Estado de estandarización de IEEE 802.16

Estado	Fecha	Estándar/Borrador	Título
En proyecto	pre-draft	Project P802.16m	Advanced Air Interface
	25/06/2008	IEEE Draft P802.16h	Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation.
	02/10/2007	IEEE Draft P802.16i	Management Plane Procedures and Services
	20/10/2008	IEEE Draft P802.16j	Multihop Relay Specification
	05/10/2008	IEEE Draft P802.16Rev2	Revisión del IEEE Std 802.16-2004 (consolidación de enmiendas)
Vigentes	01/10/2004	IEEE Std 802.16-2004	Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems
	31/12/2007	IEEE Std 802.16g-2007	Management Plane Procedures and Services (enmienda a 802.16-2004)
	01/12/2005	IEEE Std 802.16f-2005	Management Information Base (enmienda a 802.16-2004)
	28/02/2006	IEEE Std 802.16e-2005	PHY and MAC Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands (enmienda a 802.16-2004)
	28/02/2006	IEEE Std 802.16-2004/Cor1	Corrigendum a IEEE Std 802.16-2004
	17/03/2004	IEEE Std 802.16.2-2004	Revisión de IEEE Std 802.16.2-2001
	18/08/2003	IEEE Std 802.16/Conf1	Protocol Implementation Conformance Statements for 10-66 GHz
	25/02/2004	IEEE Std 802.16/Conf2	Test Suite Structure and Test Purposes for 10-66 GHz
	25/06/2004	IEEE Std 802.16/Conf3	Radio Conformance Tests for 10-66 GHz Air Interface
	15/01/2007	IEEE Std 802.16/Conf4	Protocol Implementation Conformance Statement Proforma for frequencies below 11 GHz

	14/08/2007	IEEE Std 802.16k-2007	Media Access Control (MAC) Bridges - Bridging of 802.16
Obsoletos	08/02/2002	IEEE Std 802.16-2001	Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems
	01/04/2003	IEEE Std 802.16a-2003	Amendment 2: MAC Modifications and Additional PHY Layer Specifications for 2-11 GHz
	15/01/2003	IEEE Std 802.16c-2002	Amendment 1: Detailed System Profiles for 10-66 GHz
	10/09/2001	IEEE Std 802.16.2-2001	IEEE Recommended Practice for LAN/MAN - Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems

En los siguientes apartados se describen las características de las tres principales versiones del estándar IEEE 802.16.

2.4.2.1.1 Versión inicial IEEE 802.16-2001

La primera versión del estándar IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2001 [28]) se publicó en abril de 2002, bajo el título “WirelessMAN – Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”. En ella se especificaban los niveles físico y de control de acceso al medio (MAC) para enlaces inalámbricos fijos con visión directa (LOS, *Line-Of-Sight*), en frecuencias comprendidas entre 10 y 66 GHz, con canales de anchura espectral entre 20 y 28 MHz y multiplexado TDM/TDMA. Mediante esta solución se permitían enlaces inalámbricos de última milla en configuraciones punto a multipunto, con alcances entre 1,5 y 5 km y caudales máximos entre 32 y 134 Mbit/s, según el tipo de modulación empleado (QPSK, 16QAM ó 64QAM).

El principal problema de la versión original de IEEE 802.16 era la necesidad de enlaces LOS, requiriendo el empleo de unidades de abonado exteriores y un apuntamiento muy preciso de las antenas. Para solucionar este inconveniente, en marzo de 2003 se ratificó la enmienda IEEE 802.16a, ampliándose el alcance (40-70 km) y permitiendo enlaces sin visión directa (NLOS, *Non Line-Of-Sight*) mediante la operación en frecuencias más bajas (2-11 GHz). Esta zona del espectro se caracteriza por una elevada disponibilidad a nivel mundial, incluyendo bandas de operación con y sin licencia.

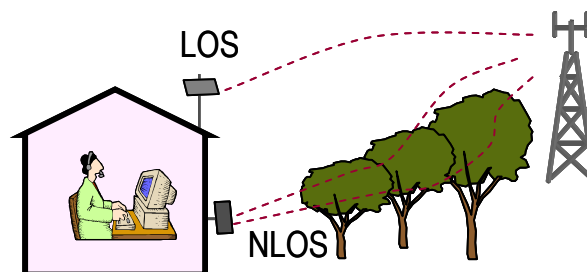


Figura 47. Enlaces IEEE 802.16 con o sin visión directa

Actualmente, la versión inicial de IEEE 802.16 y sus enmiendas (IEEE 802.a e IEEE 802.16c) se consideran obsoletas, habiendo sido reemplazadas por la versión IEEE 802.16-2004, descrita en el siguiente apartado.

2.4.2.1.2 Accesos fijos IEEE 802.16-2004

En el año 2004 se publicó la segunda versión del estándar IEEE 802.16: IEEE 802.16-2004 [30] (previamente conocida como IEEE 802.16d). Esta nueva versión toma como punto de partida la versión inicial IEEE 802.16-2001 y sus enmiendas.

El estándar IEEE 802.16-2004 contempla la operación en entornos NLOS sobre las bandas 2-11 GHz, con canales de ancho de banda variable entre 1,5 MHz y 20 MHz. En teoría, es capaz de proporcionar alcances de hasta 50 km (LOS) y tasas de bit de hasta 75 Mbit/s (sobre un canal de 20 MHz), si bien no simultáneamente (ver apartado 2.4.5). No obstante, en la práctica estas cifras son sensiblemente menores, con radios de célula típicos de hasta 8 km y caudales máximos globales por sector de unos 10-20 Mbit/s.

El estándar admite diversas implementaciones del interfaz radio, a fin de adaptarse a distintos ámbitos regulatorios y aplicaciones. Así, para enlaces LOS punto-a-punto, se contempla el empleo de TDM/TDMA. Para entornos NLOS, se recurre al empleo de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), sobre los enlaces descendente y ascendente, respectivamente. Estas tecnologías se caracterizan por una gran robustez frente al multitrayecto.

Para el duplexado de los enlaces ascendente y descendente, se consideran dos alternativas: sobre una única portadora (TDD, *Time Division Duplexing*) o sobre dos (FDD, *Frequency Division Duplexing*). A estas alternativas ha de sumarse el empleo de una serie de mecanismos avanzados que permiten adaptarse a un medio radio hostil: modulación adaptativa (ver Figura 48), corrección de errores, antenas inteligentes, control de potencia, y mecanismos de QoS.

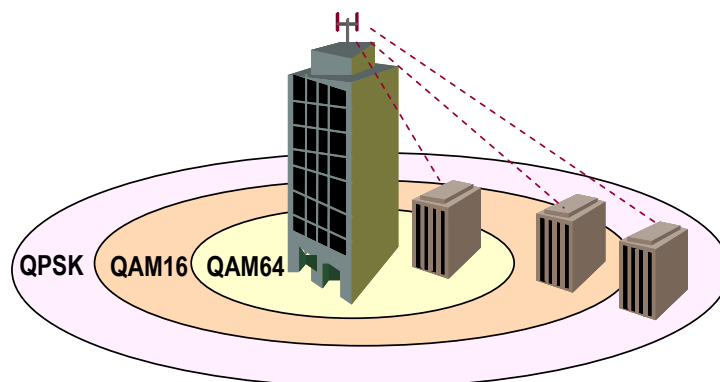


Figura 48. Modulación adaptativa en IEEE 802.16

Para el soporte de QoS, IEEE 802.16 sigue un enfoque similar a otras tecnologías, como ATM o Diffserv, recurriendo a la definición de varias clases de servicio, tal como se indica en la Tabla 22.

Tabla 22. Clases de servicio en IEEE 802.16

Clase de servicio	Descripción	Ejemplos
<i>Unsolicited Grant Service (UGS)</i>	Servicios que generan paquetes de tamaño fijo en intervalos periódicos.	- Voz sin supresión de silencios - Emulación de circuitos
<i>Real-Time Polling service (rtPS)</i>	Servicios con requisitos de tiempo real y tasa de bit variable.	- Voz con supresión de silencios - Vídeo comprimido
<i>Non-Real Time Polling service (nrtPS)</i>	Servicios sin requisitos de tiempo real y tasas de bit elevadas.	- Transferencia de ficheros
<i>Best Effort (BE)</i>	Servicios sin requisitos estrictos de QoS, utilizando la capacidad remanente.	- Navegación Web - Correo electrónico

De manera muy resumida, a cada conexión se le asigna durante la fase de establecimiento una clase de servicio. Por su parte, los mecanismos de planificación (*scheduling*) se encargan de aplicar un tratamiento adecuado a cada clase de servicio mediante el empleo de colas y mecanismos de conformado de tráfico.

Una novedad destacable de la versión IEEE 802.16-2004 es la definición del modo de operación en malla (*mesh*), que se suma a los modos punto-a-punto y punto-a-multipunto. El modo en malla, opcional en el estándar, permite comunicaciones sin visión directa (NLOS) con alcances de hasta 50 km, mediante comunicaciones multi-salto.

Así, mientras que en el modo punto a multipunto las estaciones de usuario sólo pueden comunicarse con una estación base, en el modo en malla se permite la comunicación directa entre estaciones de usuario. De este modo, una estación de usuario puede actuar como *router* para otras estaciones de usuario hasta alcanzar a la estación base que enlaza con la infraestructura de red (*backhaul*). La diferencia entre los modos de operación punto-a-multipunto y malla se ilustra en la Figura 49.

La revisión IEEE 802.16-2004, que deja obsoletas a las versiones anteriores, es precisamente el punto de partida de la tecnología WiMAX, a la que se dedica el apartado 2.4.2.2.

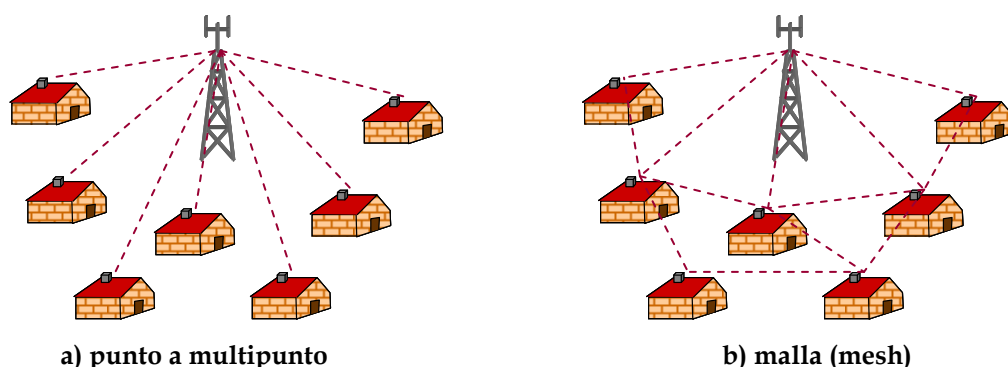


Figura 49. Modos de operación IEEE 802.16-2004: a) punto a multipunto; b) malla

2.4.2.1.3 Movilidad IEEE 802.16e-2005

A finales de 2005 se ratificó la enmienda IEEE 802.16e-2005 [31] a la versión IEEE 802.16-2004, que, entre otras cosas, incorpora las funcionalidades necesarias para el soporte de movilidad. Esta enmienda constituye la base de los perfiles WiMAX Móvil. En IEEE 802.16e se definen los procedimientos de gestión de movilidad típicos de los sistemas de comunicaciones celulares, tales como avisos (*paging*), actualizaciones de posición y traspasos. Con respecto a estos últimos, se definen tres mecanismos: HHO (*Hard Handover*), FBSS (*Fast Base Station Switching*) y MDHO (*Macro Diversity Handover*). De los tres, solamente el primero es obligatorio.

IEEE 802.16e permite un uso más eficiente de los canales radio mediante la combinación de OFDM y SOFDM (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Esta última tecnología permite la gestión dinámica de subcanales proporcionando una gran flexibilidad en la asignación de recursos radio. A las cuatro clases de servicio definidas en IEEE 802.16-2004, se añade una nueva, ertPS (*Extended Real Time Polling Service*), para servicios que generan paquetes de tamaño variable de manera periódica. Básicamente, se trata de una variante del servicio rtPS adecuada para aplicaciones de VoIP con supresión de silencios.

El estándar permite trabajar con uno o más canales de 1.5 MHz (1.75 MHz en Europa), hasta un total de 20 MHz. Esto permite adaptarse a las necesidades de tráfico particulares de la zona a cubrir, ya sean zonas rurales o urbanas. Las tasas de bit ofrecidas dependen del ancho de banda utilizado, así como de la tasa de codificación, la cual se adapta las condiciones de propagación. En teoría, con 20 MHz es posible alcanzar tasas de bit de hasta 100 Mbit/s en bajada y 30 Mbit/s en subida. Con 10 MHz, las tasas de bit se reducen hasta los 63 Mbit/s y 20 Mbit/s, respectivamente. No obstante, considerando que la eficiencia disminuye conforme las distancias aumentan, en la práctica cabe esperar tasas de bit sensiblemente menores en despliegues sobre áreas extensas.

Mediante el empleo de antenas inteligentes y técnicas de conformado de haz, los tamaños típicos de célula pueden oscilar entre 1 km (zonas urbanas) y 10 km (zonas rurales). Las bandas de operación previstas para IEEE 802.16e se sitúan por debajo de los 6 GHz, siendo las más probables para despliegues comerciales 2,3, 2,5 y 3,5 GHz, así como la de 4.9 GHz para servicios de emergencias.

2.4.2.1.4 Repetidores multisalto IEEE 802.16j

A mediados de 2005 el grupo de trabajo IEEE 802.16 aprobó la creación del grupo de estudio MMR (*Mobile Multi-hop Relay*), encargado de elaborar la enmienda IEEE 802.16j [32]. El objetivo es mejorar la cobertura, caudales y capacidad de los sistemas IEEE 802.16e mediante la incorporación de estaciones repetidoras (*Relay Station*), fijas o móviles, actuando como intermediarias entre las estaciones móviles y la estación base. El concepto básico de operación de la estación repetidora se ilustra en la Figura 50.

La enmienda IEEE 802.16j plantea la posibilidad de mejorar la cobertura en numerosos escenarios de aplicación: zonas de sombra, bordes de células, interior de edificios y a bordo de vehículos. Otras aplicaciones de interés contempladas son la cobertura temporal de eventos y situaciones de emergencia.

El estándar IEEE 802.16j proporciona una mayor eficiencia espectral debido la reutilización espacial de frecuencias por parte de los repetidores. Al mismo tiempo, se mejora la fiabilidad de las comunicaciones al permitir reemplazar enlaces de baja calidad (y caudal) entre estación base y terminal móvil, por dos o más saltos de mayor calidad (y velocidad). El actual borrador establece que el número de saltos soportados podrá ser mayor que dos (esto es, en una comunicación pueden estar involucradas varias estaciones repetidoras). Así mismo, se indica que la solución debe permitir conectividad con la RS en escenarios LOS y NLOS.

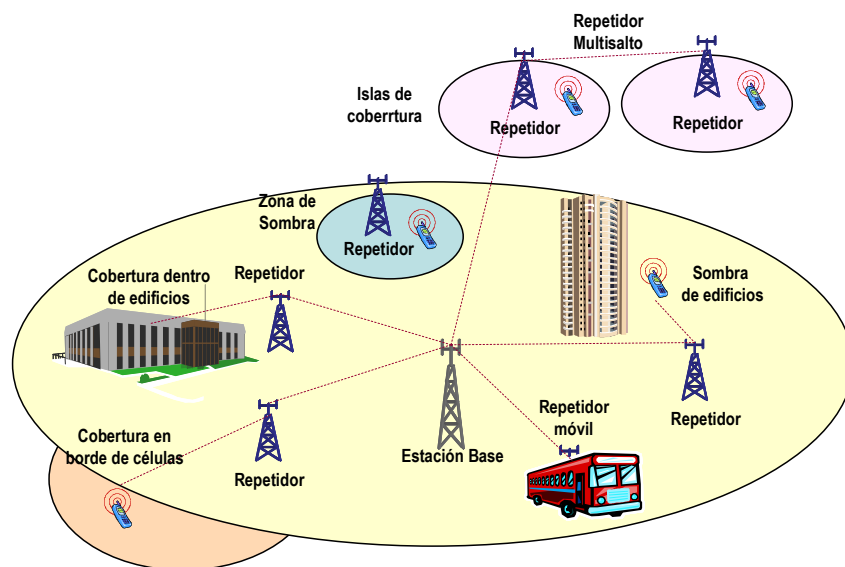


Figura 50. Estaciones repetidoras IEEE 802.16j

IEEE 802.16j constituye una evolución del estándar IEEE 802.16e, lo que implica que se mantendrán todas las funcionalidades de este último. En este sentido, el grupo de trabajo ha establecido la premisa de que las estaciones base IEEE 802.16j habrán de reutilizar, en la medida de lo posible, los procedimientos definidos en IEEE 802.16e, tanto en la capa MAC, como en la capa física. En la misma línea, se ha acordado que las estaciones base deberán ser capaces de proporcionar acceso simultáneamente a

repetidores y estaciones móviles, y que la solución no requerirá cambios en estos últimos.

El empleo de repetidores IEEE 802.16j se considera como una alternativa rentable para ampliar la cobertura y proporcionar mayores caudales en numerosos escenarios. Este planteamiento parte de la base de que una estación repetidora posee una complejidad considerablemente menor que la de una estación base, posibilitando un despliegue rápido y reduciendo los costes de operación.

2.4.2.1.5 El futuro IEEE 802.16m

La enmienda IEEE 802.16m, actualmente en fase de desarrollo, constituye el siguiente gran hito en la evolución del estándar IEEE 802.16. Su principal objetivo es proporcionar caudales de hasta 100 Mbit/s en movilidad y hasta 1 Gbit/s para accesos fijos. Estas capacidades están en consonancia con las previstas en el futuro para otros sistemas móviles celulares (por ejemplo, LTE del 3GPP).

De momento, los desarrollos están en fase experimental. Resulta llamativa una demostración que hizo Samsung en la feria 3GSM en febrero de 2007, donde se consiguió duplicar el caudal de una conexión WiMAX mediante el empleo conjunto de MIMO y de antenas inteligentes. También destacan los resultados de los experimentos desarrollados por NTT DoCoMo en Japón, habiendo obtenido tasas de transferencia de 5 Gbit/s sobre un canal de 100 MHz. Para ello han utilizado esquemas de transmisión MIMO de 12x12 antenas y un sistema patentado de tratamiento de señal.

La ratificación de la enmienda IEEE 802.16m se prevé para finales de 2009. Por su parte, el WiMAX Forum ya está trabajando en una nueva versión de WiMAX para certificar productos basados en IEEE 801.16m, oficialmente denominada WiMAX Release 2 (y coloquialmente, "WiMAX 2.0").

2.4.2.2 WiMAX Forum

Un aspecto crítico en los estándares IEEE 802.16, como se ha visto en el apartado 2.4.2.1.2, es la gran cantidad de opciones que contempla. Este es precisamente el motivo que dio lugar a la constitución, a mediados de 2001, del WiMAX Forum [29]. Su objetivo es promover la interoperabilidad de equipos y sistemas basados en el estándar IEEE 802.16 mediante la definición de un número limitado de perfiles (conjuntos de parámetros soportados). En la actualidad, el organismo cuenta con más de 450 miembros, incluyendo fabricantes, suministradores y operadores.

El WiMAX Forum está organizado en varios grupos de trabajo, tal como se muestra en la Tabla 23. En la Figura 51 se representa el procedimiento de certificación definido por el WiMAX Forum, el cual se lleva a cabo en una serie de laboratorios homologados. Los equipos que superan con éxito el proceso obtienen el correspondiente certificado y quedan incluidos en una base de datos, lo que les faculta para salir al mercado con el sello "WiMAX Forum Certified".

Tabla 23. Grupos de trabajo del WiMAX Forum

Grupo de Trabajo	Descripción
Proveedores de Servicio (SPWG)	Interacción con proveedores de servicios para identificar los requisitos de red y de interfaz radio
Aplicaciones (AWG)	Definición de aplicaciones sobre WiMAX
Red (NWG)	Especificación de arquitectura de red WiMAX como sistema completo y no sólo como interfaz radio
Técnico (TWG)	Definición de perfiles radio WiMAX y especificación de pruebas de certificación
Certificación (CWG)	Gestión operativa del programa certificación de equipos del WiMAX Forum
Regulatorio (RWG)	Consenso con organismos internacionales para la disponibilidad de espectro para WiMAX
Marketing (MWG)	Difusión, relaciones con la prensa y gestión de miembros del WiMAX Forum
Roaming Global (GRWG)	Acuerdos de <i>roaming</i> a nivel global

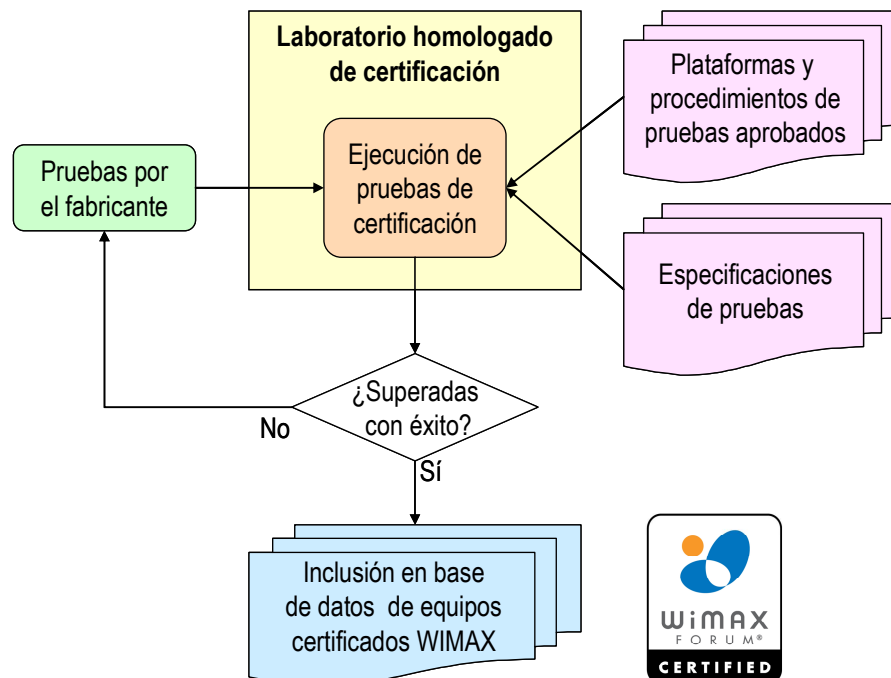


Figura 51. Proceso de certificación de equipos WiMAX

2.4.2.2.1 Perfiles WiMAX Fijo

Las primeras versiones de WiMAX están basadas en un subconjunto del estándar IEEE 802.16-2004, estando orientadas pues a escenarios con enlaces radio fijos. Para este tipo de escenarios, el WiMAX Forum ha definido los cinco perfiles de certificación mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24. Perfiles WiMAX para accesos fijos

Perfiles de certificación WiMAX fijo		
Banda de operación	Duplexado	Ancho de canal
3,5 GHz	TDD	3,5 MHz
3,5 GHz	TDD	7 MHz
3,5 GHz	FDD	3,5 MHz
3,5 GHz	FDD	7 MHz
5,8 GHz	TDD	10 MHz

Cada perfil determina una familia de productos interoperables en función de la banda de operación, la canalización y modo de duplexado (FDD o TDD) utilizados. En la banda de 3.5 GHz, con licencia, se contemplan perfiles en modo FDD y TDD, con canales de 2,5 MHz ó 7 MHz. Esta banda está disponible prácticamente en todo el mundo salvo en EE.UU. y algunos otros pocos países. En la banda de 5,8 GHz, se considera un único perfil basado en TDD con canales de 10 MHz. Se trata de una banda disponible para operación sin licencia en prácticamente todas las regiones del mundo.

El WiMAX Forum deja abierta la posibilidad de definir nuevos perfiles en el futuro para adaptarse a las necesidades de fabricantes y operadores.

2.4.2.2.2 Perfiles WiMAX Móvil

Basándose en la enmienda IEEE 802.16e-2005 para el soporte de movilidad en sistemas IEEE 802.16, el WiMAX Forum definió en 2006 un primer conjunto de perfiles de certificación para equipos WiMAX Móviles [33]. Este primer conjunto, denominado *Release 1.0*, está formado por los doce perfiles mostrados en la Tabla 25.

Se están definiendo nuevos perfiles WiMAX Móvil bajo las *Releases* 1.5 (ya disponible) y 2.0 al mismo tiempo que se están desarrollando las nuevas versiones de IEEE 802.16. En la Figura 52 se muestra la planificación prevista para los perfiles WiMAX Móvil.

Tabla 25. Perfiles WiMAX Móvil

Perfiles de certificación WiMAX Móvil		
Banda de operación	Duplexado	Ancho de canal
2,3 - 2,4 GHz	TDD	8,75 MHz
2,3 - 2,4 GHz	TDD	5 MHz / 10 MHz
2,305-2,320 / 2,345-2,360 GHz	TDD	5 MHz
2,305-2,320 / 2,345-2,360 GHz	TDD	10 MHz
2,496 - 2,69 GHz	TDD	5 MHz / 10 MHz
3,3 - 3,4 GHz	TDD	5 MHz
3,3 - 3,4 GHz	TDD	7 MHz
3,4 - 3,8 GHz	TDD	5 MHz
3,4 - 3,6 GHz	TDD	5 MHz
3,4 - 3,6 GHz	TDD	7 MHz
3,4 - 3,8 GHz	TDD	10 MHz
3,4 - 3,6 GHz	TDD	10 MHz

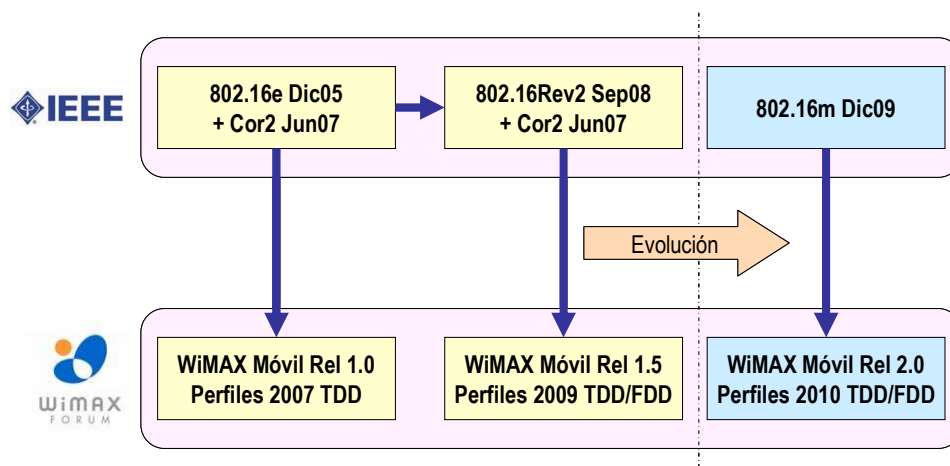


Figura 52. Calendario de especificación de perfiles WiMAX Móvil

2.4.3 Estructura y elementos de red

En principio, las tecnologías IEEE 802.16/WiMAX se centran en la especificación de una familia de interfaces radio normalizadas, susceptibles de ser utilizadas en diversos escenarios de interés. Bajo esta óptica cada operador puede recurrir a la arquitectura de red que mejor se adapte a sus necesidades. No obstante,

centrándonos en su uso como tecnología de acceso de última milla, la estructura típica de una red IEEE 802.16 WiMAX es esencialmente la misma que la de cualquier sistema de comunicaciones celulares.

En la Figura 53 se muestra la arquitectura genérica de una red basada en IEEE 802.16/WiMAX. En el segmento de acceso, los elementos fundamentales son las estaciones base y las unidades de abonado, las cuales pueden ser fijas (de exterior o de interior) o móviles (por ejemplo, tarjetas PCMCIA para ordenadores portátiles).

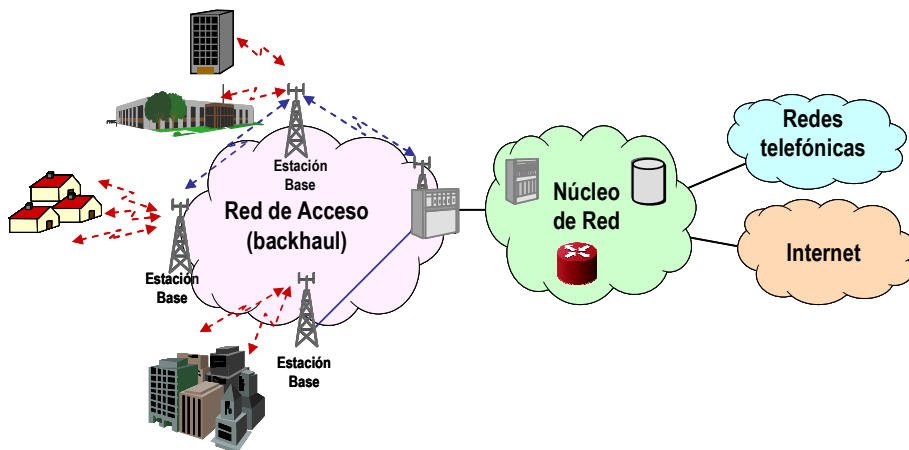


Figura 53. Arquitectura general de una red WiMAX

Las unidades de abonado pueden dar servicio a uno o más abonados, pudiendo proporcionar diferentes interfaces a los usuarios finales (circuitos dedicados E1/T1, $n \times 64$ kbit/s, Ethernet, ...). Qué interfaces en concreto presenta un equipo terminal suele ser una característica configurable de los mismos, siendo éste un aspecto muy dependiente del fabricante.

Las estaciones base, estratégicamente distribuidas sobre el área geográfica a cubrir, proporcionan la cobertura radioeléctrica adecuada a las unidades de abonado, con las cuales se comunican mediante el interfaz radio IEEE 802.16/WiMAX. El área de cobertura de cada estación base puede ser de mayor o menor tamaño según el escenario considerado (entornos urbanos, rurales, interior de edificios,...).

Por su otro extremo, las estaciones base se conectan mediante los oportunos interfaces (cableados o inalámbricos) a la infraestructura de acceso o *backhaul*, a través de la cual se alcanza el núcleo de red y, desde éste, si es necesario, a otras redes externas (redes telefónicas, Internet, etc.).

Como se ha indicado, en principio no cabe hablar de una arquitectura de red IEEE 802.16/WiMAX ya que esta dependerá en gran medida de los escenarios de aplicación y servicios concretos que desee proporcionar el operador. No obstante, en su afán de promover las soluciones interoperables, el grupo de trabajo de red (NGW) del WiMAX Forum ha dado un paso al frente mediante la definición del modelo de referencia de red (NRM) [34].

El modelo NRM abarca no sólo la arquitectura de red sino también las funciones a implementar en los distintos elementos involucrados. Las especificaciones están planteadas de manera evolutiva, mediante la publicación de sucesivas versiones o “releases” que irán incorporando nuevas funcionalidades. En la Figura 54 se muestra una visión simplificada del modelo NRM de la *Release 1*, actualmente en desarrollo.

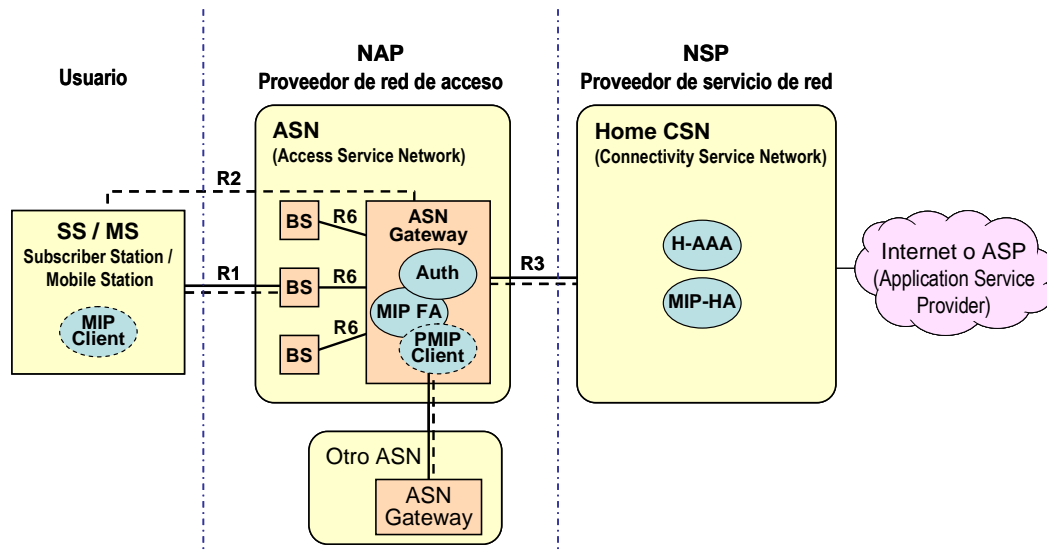


Figura 54. Arquitectura de referencia WiMAX NRM *Release 1*

El NRM define una arquitectura de red WiMAX basada en IP que permite el soporte de usuarios fijos, nómadas y móviles. La red se descompone en tres partes: los terminales (MS), la red de acceso (ASN) y la red de conectividad (CSN).

La red de acceso consta de una o más subredes ASN, cada una de ellas constituida por un conjunto de estaciones base (BS) y una pasarela ASNG (ASN gateway). Esta pasarela desempeña un papel equivalente al de los controladores de estaciones base empleados en la mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles celulares (por ejemplo, BSCs en GSM o RNCs en UMTS). El ASNG es el elemento responsable de gestionar las BS a su cargo, incluyendo todas las funciones necesarias para desempeñar adecuadamente dicho papel. Entre estas funciones, el modelo NRM incluye la asignación de direcciones, la autenticación de terminales, la gestión de recursos radio y la gestión de QoS (control de admisión, *policing*,...).

La red de conectividad (CSN, *Connectivity Service Network*) incluye elementos de conmutación y de control, proporcionan conectividad IP hacia otras redes. Entre las funciones proporcionadas por el CSN se incluyen también otras funciones típicas como asignación de direcciones, autenticación, localización, movilidad, gestión de QoS,...

Las especificaciones iniciales del NRM se centran en la provisión de servicios de acceso a Internet con soporte de movilidad, para lo cual se ha establecido el empleo de los estándares IP Móvil del IETF. En versiones posteriores, está previsto el

soporte de servicios avanzados incluyendo VoIP, servicios de difusión (por ejemplo, TV) y servicios IMS.

Otro aspecto abordado por el grupo de trabajo de red del WiMAX Forum es el interfuncionamiento entre WiMAX y otros sistemas: UMTS, CDMA2000 y redes de acceso fijas (Cable y ADSL).

2.4.4 Madurez de la tecnología y del mercado

España fue pionera en la instalación del primer laboratorio de certificación de equipos WiMAX (Cetecom Labs, en Málaga), en Julio de 2005. A finales de 2008, la base de datos del WiMAX Forum incluía un total de 73 productos certificados de 28 fabricantes. A modo de ejemplo, entre los fabricantes con productos certificados se incluyen Motorola, Huawei, NEC, Alvarion, Alcatel-Lucent, Siemens, Intel, Airspan, Redline, Aperto, Samsung, y ZTE. En la Figura 55 se muestran algunos dispositivos WiMAX certificados.

Las primeras redes WiMAX fijas basadas en el estándar IEEE 802.16-2004 comenzaron a desplegarse en 2006. Gracias a la tecnología WiMAX, muchos operadores de servicios LMDS han visto la posibilidad de relanzar su oferta de servicios que durante años se ha mantenido muy por debajo de las expectativas iniciales.



Figura 55. Ejemplo de dispositivos WiMAX certificados

El primer despliegue comercial de WiMAX Móvil tuvo lugar en abril de 2007, con el lanzamiento del servicio WiBro de Korea Telecom. En tan sólo tres meses, el operador contaba con más de 20.000 abonados al servicio. El ritmo de crecimiento en los últimos meses se ha incrementado espectacularmente gracias a la comercialización de un módem USB para ordenadores portátiles. El operador tiene previsto en el futuro el lanzamiento del servicio "Wibro version 2", soportando velocidades de bajada de 34,6 Mbit/s y de subida de 8 Mbit/s.

En septiembre de 2007, Motorola hizo una demostración de la tecnología WiMAX Móvil a más de 80 km/h sobre el famoso tren elevado de Chicago. Ese mismo año, el operador Sprint Nextel comenzó el despliegue de una red WiMAX Móvil nacional en la banda de 2,5 GHz. Comercializado bajo la marca XOHM, el servicio se ofrece desde octubre de 2008 en las ciudades de Baltimore, Chicago y Washington DC.

En el caso de España, la comercialización de servicios WiMAX es aún relativamente escasa. Los operadores facultados para ello (ver apartado 2.4.7) siguen ofreciendo en gran medida servicios LMDS basados en soluciones propietarias o pre-WiMAX. No obstante, recientemente han aparecido reseñas en las que se indica la oferta de servicios WiMAX Fijo y pruebas piloto de WiMAX Móvil.

Así, por ejemplo, el operador Iberbanda (antigua, FirstMark), filial de Telefónica, ofrece servicio WiMAX Fijo en virtud de la licencia de operación en la banda de 3,5 GHz que le fue adjudicada en 2000. El mercado principal del operador se centra en la provisión de servicios de banda ancha en zonas rurales donde no existe penetración de ADSL o Cable, a través de concursos promovidos por comunidades autónomas (Andalucía, Cataluña, Navarra y Castilla y León). Los servicios comercializados incluyen tanto voz como datos, con velocidades de hasta 4 Mbit/s simétricos. Otro operador LMDS español, Neo Sky, poseedor de licencias LMDS en 3,5 GHz y 26 GHz, ha anunciado en octubre de 2008 la realización de pruebas de WiMAX Móvil en Madrid.

2.4.5 Prestaciones

Las prestaciones de las tecnologías IEEE 802.16 / WiMAX difieren mucho en función de la banda de frecuencia y anchura de canales empleados, así como de y las condiciones de propagación (distancia a la estación base, interferencias, visibilidad,...). Así, teóricamente el estándar IEEE 802.16 contempla la posibilidad de alcanzar caudales de hasta 75 Mbit/s y distancias de hasta 50 km. Sin embargo, la consecución de estos límites máximos están asociada al empleo de enlaces con visión directa (LOS) sobre un par de portadoras de 20 MHz. En la práctica, las condiciones de propagación y el ancho de banda disponible en los escenarios de interés se traducen en unas prestaciones sensiblemente inferiores.

Como se ha indicado, el caudal disponible depende del ancho de canal empleado, que según el estándar IEEE 802.16 puede variar entre 1,5 y 20 MHz. En la Tabla 26 se muestra las tasas de bit a nivel físico para distintos anchos de canal en función de la modulación empleada.

Tabla 26. Tasas de bit (en Mbit/s) de IEEE 802.16 según ancho de canal y modulación

		Modulación					
		QPSK		16QAM		64 QAM	
		Tasa de codificación		Tasa de codificación		Tasa de codificación	
		1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Ancho de canal	1,75 MHz	1,04	2,18	2,91	4,36	5,94	6,55
	3,5 MHz	2,08	4,37	5,82	8,73	11,88	13,09
	5 MHz	4,16	6,28	8,32	12,48	16,63	18,70
	7 MHz	4,15	8,73	11,64	17,45	23,75	26,18
	10 MHz	8,31	12,47	16,63	24,94	33,25	37,40
	20 MHz	16,62	24,94	33,25	49,87	66,49	74,81

Los caudales indicados en la Tabla 26 son en condiciones óptimas de propagación. Por otro lado, en el caso de WiMAX, los perfiles definidos contemplan sólo algunos de los anchos de canal indicados (3,5 MHz y 7 MHz para WiMAX Fijo y entre 5 MHz y 10 MHz para WiMAX Móvil). De este modo, los caudales típicos agregados por sector que cabe esperar en los sistemas WiMAX se pueden estimarse entre 5 y 10 Mbit/s.

Alcance y caudal en WiMAX son conceptos antagónicos, de modo que cuanto mayor es la distancia menor es el caudal y viceversa. Este comportamiento se observa claramente en la Figura 56, donde se muestra la relación entre alcance y velocidad para distintos entornos de cobertura con o sin visión directa (LOS o NLOS respectivamente).

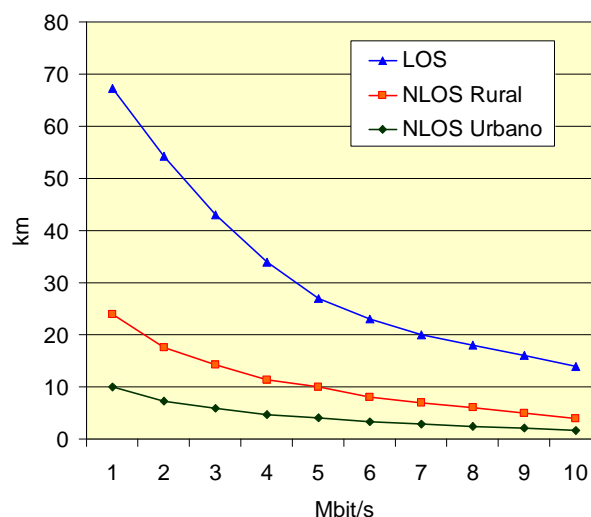


Figura 56. Prestaciones de sistemas WiMAX: alcance versus caudal

Los resultados corresponden a enlace WiMAX fijo en la banda de 3,5 GHz y con un ancho de canal de 3,5 MHz. Los radios de cobertura típicos en entornos urbanos oscila entre 1 y 3 km, mientras que en áreas rurales las estimaciones suben a entre 5 y 10 km. En estas condiciones, el caudal máximo que cabe esperar es inferior 10 Mbit/s por sector.

A la hora de evaluar las prestaciones de WiMAX es necesario también considerar el número de usuarios a los que se pretende dar cobertura. Los valores de capacidad anteriormente mencionados son agregados, siendo las prestaciones individuales percibidas por los usuarios inferiores, en función del número de usuarios por sector. Así, en zonas con alta densidad de usuarios, puede ser necesario reducir el tamaño de las células (lo que equivale a un mayor número de estaciones base) con objeto de garantizar un caudal medio adecuado por usuario. En este tipo de escenarios, resulta adecuado el empleo de técnicas de sectorización, similar a como se hace en los sistemas de comunicaciones móviles celulares GSM y UMTS.

2.4.6 Adecuación a los servicios considerados

A continuación se indica la adecuación de IEEE 802.16/WiMAX para el soporte de los servicios de interés en el presente estudio:

- **Telefonía:** La tecnología IEEE 802.16/WiMAX es adecuada para este tipo de servicio, disponiendo de los mecanismos adecuados para garantizar los requisitos de retardo. En concreto, se puede hacer uso de las clases de servicio UGS y rtPS definidas en IEEE 802.16-2004, a los que se viene a sumar la clase ertPS en IEEE 802.16e-2005.

El soporte de VoIP está contemplado dentro de los servicios del Subsistema IP Multimedia (IMS). Esta funcionalidad, prevista en la *Release 5* del 3GPP, aún no está soportada por los operadores, si bien se prevé su implantación a corto plazo.

- **Acceso a Internet:** Es uno de los servicios clave ofertado por los operadores de bucle de acceso inalámbrico. De hecho, muchos de los despliegues iniciales de este tipo de redes se han centrado en ofrecer acceso de banda ancha a Internet en zonas donde no existía cobertura mediante ADSL o cable.

El servicio de *videostreaming* es factible, siempre y cuando el número de usuarios no sea muy elevado. En caso de considerar su uso masivo, se hace imprescindible recurrir a técnicas de multicast a fin de evitar la existencia de múltiples flujos simultáneos de audio y vídeo en la red. Este es precisamente uno de los objetivos del servicio MBS (*Multicast Broadcast Service*), que está definiendo el WiMAX Forum.

El soporte de **juegos en red** con alta interactividad es también factible gracias a la baja latencia de las tecnologías IEEE 802.16/WiMAX.

La tecnología IEEE 802.16/WiMAX es adecuada para las aplicaciones de **descarga entre pares (p2p)**, si bien el elevado consumo de recursos que

requieren (tanto en sentido ascendente como descendente) puede plantear problemas de escalabilidad a los operadores. Como en el caso de otras tecnologías (por ejemplo, HSPA), los operadores pueden verse obligados a introducir mecanismos para regular el volumen de tráfico descargado por los usuarios.

- **Distribución de TV:** Para poder ofrecer una calidad “similar” a la de la TV estándar (para visualización en aparatos de TV en hogares) se requiere una tasa de bit entre 2 y 5 Mbit/s por canal. La oferta de un número atractivo de canales requeriría una capacidad mayor que la que típicamente se dispone en una célula WiMAX. En consecuencia, estas tecnologías no son adecuadas para la distribución de TV estándar.

2.4.7 Aspectos regulatorios

La asignación de espectro en España es responsabilidad de la Secretaría de Estado Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Siguiendo las directivas de la UE sobre gestión y armonización del espectro, dicho organismo elabora cada dos años el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [35].

El CNAF actualmente en vigor se aprobó por Orden ITC/3391/2007 de 15 de noviembre [36]. En dicho cuadro, y las distintas normas de utilización nacional (UNs) que establece, se contemplan varias bandas de frecuencias susceptibles de ser empleadas para la prestación de servicios de acceso inalámbrico de banda ancha.

Centrándonos en las frecuencias de operación soportadas por los perfiles WiMAX definidos hasta la fecha, las dos bandas de operación posibles en España son:

- Banda 2,30-2,45 GHz (UN-50). Se permite su uso para radioenlaces digitales punto a multipunto. No obstante, se contemplan otros usos (por ejemplo, radioenlaces móviles de televisión), por lo que pueden existir interferencias.
- Banda 3,4-3,6 GHz (UN-107). Esta banda se reserva parcialmente para aplicaciones militares de radiolocalización (3485-3495, y 3585-3595 MHz). El espectro restante, descontando las bandas de guarda, está disponible para la prestación de servicios fijos o móviles, dividiéndose en ocho subbandas de 20 MHz a asignar en pares (AA', BB', CC' y DD') con separación de 100 MHz, tal como se muestra en la Figura 57.

En el año 2000, en España se concedieron seis licencias para la operación de servicios LMDS: tres de 3,5 GHz (Neo, Iberbanda y Basa) y otras tres de 26 GHz (Broadnet, Sky Point y Jazztel). Tras renuncias, compras y fusiones, actualmente sólo existen tres operadores en funcionamiento: Iberbanda, Neo-Sky y Clearwire. Los tres disponen de licencia en la banda de 3,5 GHz, por lo que pueden desplegar sistemas WiMAX.

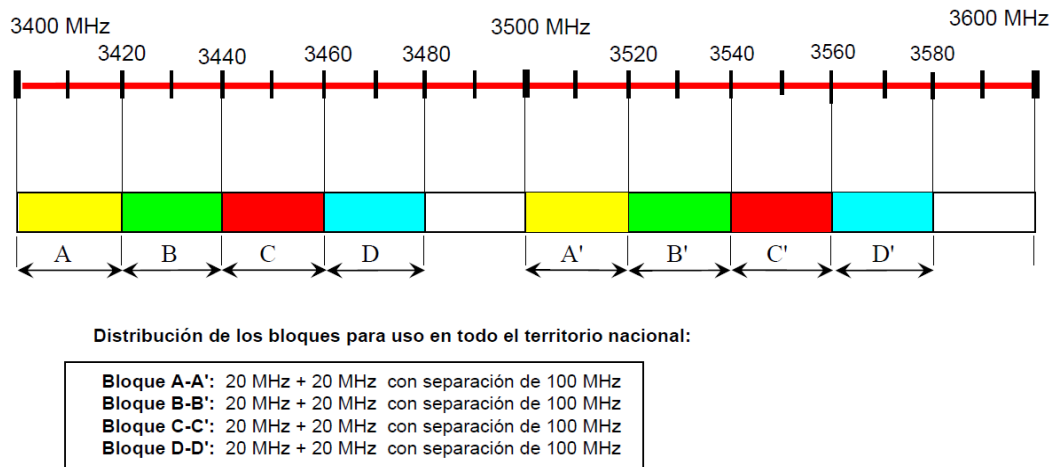


Figura 57. Regulación de la banda 3,5 GHz en España

2.4.8 Escalabilidad

La escalabilidad de los sistemas de acceso inalámbrico IEE 802.16 / WiMAX es similar a la de los sistemas de comunicaciones móviles celulares. Dicha escalabilidad se puede analizar fundamentalmente desde dos perspectivas: cobertura y capacidad. En el primer caso, la única alternativa es la instalación de nuevas estaciones base (considerando que el aumento de potencia en alguna de las estaciones base existentes no pudiera dar servicio a la nueva zona a cubrir). Esto supone encontrar un emplazamiento adecuado para dicha estación base, equiparla y conectarla a la red troncal mediante la infraestructura de transporte adecuada (fibra, radio punto a punto).

En cuanto al incremento de capacidad, puede obedecer a dos motivos: que aumente el número de abonados, o el caudal demandado por éstos (por ejemplo, por la aparición de nuevos servicios). Las alternativas en este caso, ordenadas de menor a mayor coste, son:

- Incrementar el número de portadoras utilizadas en un determinado sector. La limitación en este caso vendría impuesta por el número de portadoras disponibles en esa ubicación, ya sea por restricciones de licencia o por el patrón de reutilización de frecuencias de la red.
- Aumentar el número de sectores de una estación base. El problema en este caso sigue siendo la limitación del espectro disponible, ya que habría que replantearse el esquema de reutilización de frecuencias a fin de evitar interferencias en los sectores ya existentes. Adicionalmente habría que volver apuntar las antenas de los usuarios a los nuevos sectores creados.
- Añadir nuevas estaciones base, redistribuyendo los usuarios entre las nuevas y las ya existentes. Para conseguirlo, es necesario reducir la potencia de transmisión de la estación base, con lo cual se disminuye la zona de cobertura de la misma.

2.4.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

2.4.9.1 Consideraciones medioambientales

Las redes de acceso inalámbricas, como todos los sistemas radioeléctricos, están sujetas a límites en cuanto a potencia radiada. La recomendación europea 1999/519/EC [37] establece niveles máximos de exposición del público general a campos electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz. El Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre [38], que traslada a la legislación española el contenido de la recomendación citada, establece un reglamento sobre condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. En particular, el anexo II del reglamento recoge los límites de exposición a emisiones de distintas frecuencias. Posteriormente, el Real Decreto 424/2005 de 15 de abril [39] sobre condiciones para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas, el servicio universal y la protección de los usuarios adoptó el reglamento de 2001 sin modificaciones en cuanto a los límites de exposición.

Las limitaciones que dicho reglamento indica, para las bandas de frecuencia utilizadas por las redes de acceso inalámbricas, son las siguientes:

- Entre 100 kHz y 10 GHz, se limita el índice de absorción específica de energía SAR (*Specific Energy Absorption Rate*). El SAR se define como potencia absorbida por unidad de masa de tejido corporal, cuyo promedio se calcula en la totalidad del cuerpo o en partes de éste, y se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). El SAR localizado en cabeza y tronco queda limitado a 2 W/kg y el SAR localizado en miembros a 4 W/kg.
- Entre 10 GHz y 300 GHz, se limita la densidad de potencia, S , a un máximo de 10 W/m².

Por otra parte, la Orden CTE/23/2002 de 11 de enero [40] regula los estudios y certificados sobre las emisiones de las estaciones radioeléctricas que deberán acompañar el proyecto técnico para la aprobación de una nueva instalación así como de las ya existentes. Dicha Orden Ministerial incluye el concepto de “zona sensible” como aquella en la que se deben minimizar las emisiones electromagnéticas. Para la reducción de los niveles de exposición en dichas zonas, se tienen en cuenta factores como la elección de la ubicación de las antenas, su posición en altura, su enfoque, dirección y técnicas de reducción de potencia disponibles en las redes de telefonía, factores que, elegidos adecuadamente, posibilitan una minimización de las emisiones electromagnéticas en dichas zonas.

En general las redes de acceso inalámbrico están muy por debajo de los límites citados, debido a las bajas potencias de emisión consideradas: en la mayoría de los casos basta con una potencia de emisión por debajo de 10 W para las estaciones base y 100 mW para los equipos terminales.

2.4.9.2 Consideraciones meteorológicas

Las bandas de frecuencias utilizadas por las redes de acceso inalámbrico presentan cierta sensibilidad a los hidrometeoros (lluvia, nieve,...) y a los gases atmosféricos (sobre todo vapor de agua). Esta dependencia se mide utilizando el índice de precipitación al 0,01%, R , definido en la recomendación P.837 del sector de Radiocomunicaciones de Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) [41]. Este parámetro determina la intensidad de lluvia que se supera en una zona el 0,01% del tiempo en un año medio. La Figura 58 muestra los valores correspondientes a dicho parámetro para el caso de la península ibérica y Baleares. A modo de ejemplo [42], un enlace WiMAX de 10 km diseñado según un modelo de espacio libre, puede ver reducido su alcance a tan sólo 3 km con un valor $R=25$.

No obstante, cabe señalar el impacto en las bandas de operación de los sistemas WiMAX (2,4 GHz y 3,5 GHz) es menos crítico que en bandas de operación más elevadas.

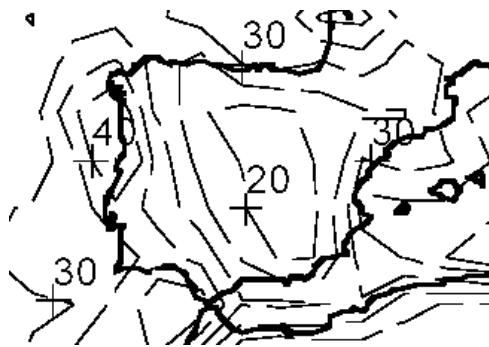


Figura 58. Valores de R según UIT-R P.837

2.4.9.3 Consideraciones geográficas

Los sistemas de acceso inalámbrico son muy sensibles a los obstáculos. De ahí que el alcance en entornos LOS sea significativamente mayor que en situaciones NLOS. En situaciones extremas, cabe recurrir al empleo de repetidores (por ejemplo, IEEE 802.16j).

2.5 Redes de acceso por satélite

2.5.1 Motivación original y evolución

Desde su origen, una de las misiones más importantes y desarrolladas de los satélites ha sido la de comunicaciones. Tradicionalmente los satélites de comunicaciones se han utilizado, a lo largo de más de 40 años de servicio comercial, para establecer enlaces troncales, de larga distancia, internacionales, que transportan circuitos telefónicos conmutados, circuitos alquilados y señales de contribución de televisión punto a punto¹⁶ [43] [44].

Los satélites convencionales de servicios de comunicaciones fijas son transpondedores, es decir, repetidores radio situados en órbita que reciben señal desde una estación terrena en una banda de frecuencia determinada, la trasladan de frecuencia y amplifican, volviendo a transmitir la señal a su zona de cobertura en la tierra. Dichos transpondedores, que constituyen la denominada carga útil del satélite, actúan como radioenlaces punto a multipunto situados en órbita. La banda de frecuencias empleada en la primera generación de satélites para comunicaciones fijas (FSS, *Fixed Satellite Service*) es la banda C, 4-8 GHz. Esta banda se sigue utilizando y está prácticamente saturada.

Este tipo de sistemas se han venido usando también para comunicaciones bidireccionales entre usuarios corporativos, con acceso al satélite mediante terminales con tamaños típicos de antenas entre 1 y 2 m, terminales conocidos como VSAT (*Very Small Aperture Terminal*). Los más pequeños, con antenas menores de 0,5 m, se llaman USAT (*Ultra Small Aperture Terminal*). Las comunicaciones en estos sistemas se cursan a través de una estación central (*hub*), no habiendo comunicación directa entre terminales VSAT. Aplicaciones típicas de estas redes son la transmisión de datos y la televigilancia, ambas de baja velocidad.

En general, las redes satélite se caracterizan por

- Muy amplia cobertura, rapidez de instalación de los terminales y coste independiente de la distancia dentro de la zona cubierta. Alcance en ubicaciones remotas trascendiendo barreras geográficas. Un mismo satélite puede incluir haces con diferentes coberturas.
- Capacidad entre decenas y centenas de Mbit/s en el sentido descendente hacia los terminales (*downlink*) y generalmente menor en el ascendente hacia el satélite (*uplink*). La capacidad depende de las características de cada sistema y en particular del tamaño de las antenas.

¹⁶ El INTELSAT 1 ("Early Bird"), lanzado en 1965, tenía capacidad para 240 circuitos telefónicos ó 1 canal de TV en blanco y negro. 10 años después se lanzó el INTELSAT 6 con capacidad para 35000 circuitos de voz y 2 canales de TV en color. Ya se han superado los 400 canales de TV en un único satélite.

- Adecuación para servicios de difusión y multicast debido a la habilidad del satélite de transmitir la misma señal a todos los puntos en una determinada área geográfica.

Tres grandes segmentos constituyen la base de una red de comunicaciones por satélite [45]:

- El segmento espacial, integrado por uno o más satélites, en este último caso forman lo que se denomina constelación.
- El segmento de control, formado por el conjunto de facilidades de tierra encargadas de monitorizar y telecomandar el satélite mediante la Estación de Control del Satélite (SCC) y controlar las comunicaciones de la red mediante el Centro de Control de Red (NCC).
- El segmento terreno, formado por los terminales de usuario y las estaciones de servicio (pasarelas, *hubs*, interfaces, ...)

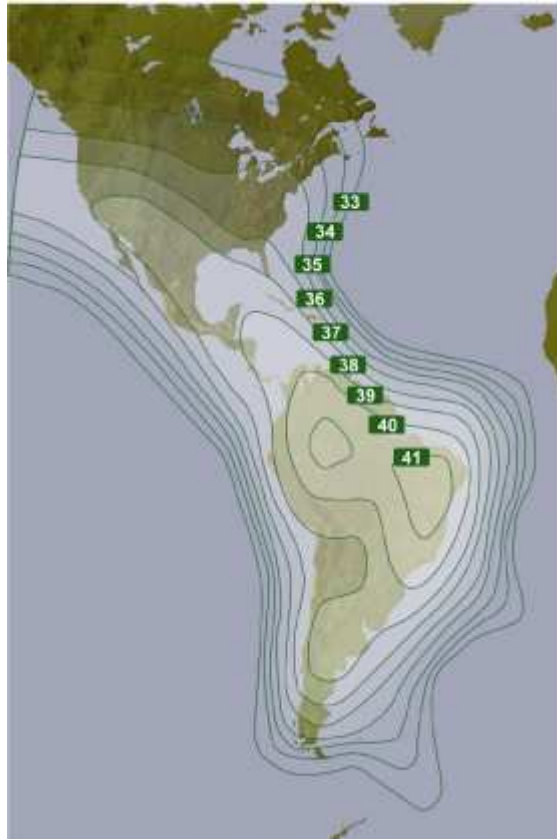
Los sistemas de comunicaciones por satélite citados anteriormente ubican los satélites en órbita geoestacionaria (GEO). La órbita GEO¹⁷ es una órbita en el plano ecuatorial situada a 35.786 km de la superficie de la Tierra [43], que tiene un periodo de rotación de un día. Los satélites situados en ella aparecen fijos en el espacio para un observador de la Tierra. Tres satélites equiespaciados en dicha órbita permiten cubrir prácticamente toda la tierra, con excepción de las zonas polares. Esto permite dar servicio en zonas muy amplias, por ejemplo facilita la distribución de TV en un continente (ver Figura 59), otra de las aplicaciones tradicionales y significativas de los satélites.

La órbita GEO tiene como inconvenientes un retardo y atenuación elevados. Según la aplicación, el impacto del retardo puede ser relevante (ej. telefonía, datos interactivos) o no (ej. TV), mientras que el bajo nivel de la señal impone el uso de terminales, fijos o transportables en general, receptores de TV o VSATs, con antenas más o menos grandes que apuntan al satélite. Sin embargo, gracias a la evolución tecnológica de terminales y transpondedores, algunas redes de satélites GEO como Inmarsat¹⁸ permiten actualmente el acceso desde terminales portátiles de tamaño pequeño (200 x 150 mm y peso < 1kg) a velocidades bajas, por ejemplo hasta 240/384 kbit/s (envío/recepción IP estándar).

En la Figura 60 se muestran los elementos básicos de una red VSAT de comunicaciones por satélite. Este ejemplo es un caso típico en el que las comunicaciones se realizan a través de un *hub* que es una estación de mayores prestaciones que los terminales VSAT, constituyendo una red en estrella.

¹⁷ A.C. Clarke propuso este tipo de órbita en 1945.

¹⁸ Inmarsat *Broadband Global Area Network* (BGAN)



Fuente: Hispasat

Figura 59. Ejemplo de cobertura del satélite Hispasat/Amazonas

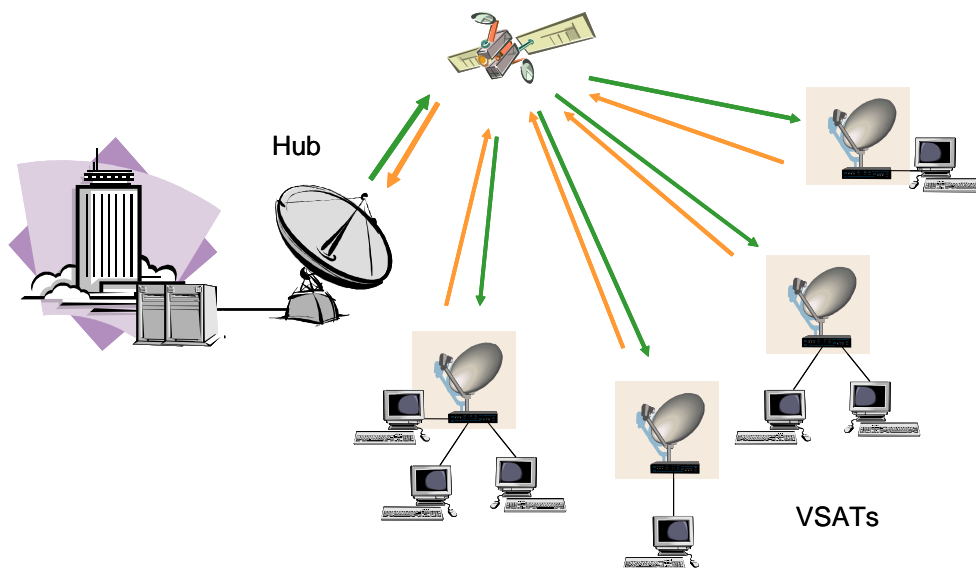


Figura 60. Red VSAT de comunicaciones por satélite.

2.5.1.1 Claves de la evolución de los sistemas por satélite

Algunos de los aspectos más relevantes que han impulsado la evolución de los satélites de comunicaciones son los siguientes:

1. Disponibilidad de nuevas posiciones orbitales no geoestacionarias (NGEO): órbitas bajas (*Low Earth Orbit*, LEO), y medias (*Medium Earth Orbit*, MEO) que disminuyen los retardos en las comunicaciones
2. Nuevas frecuencias para los enlaces radio
3. Evolución tecnológica, en especial de la carga útil del satélite: el repetidor deja de serlo y pasa a incorporar conmutación a bordo que, junto con el uso de antenas de cobertura multihaz, permiten comunicaciones más dirigidas, bidireccionales y antenas menores en los terminales de usuario.

Todo ello ha favorecido la aparición de nuevos sistemas de comunicaciones por satélite que, por una parte, hacen posible el acceso directo de los usuarios al satélite al reducir el tamaño y el coste de los terminales y, por otra, facilitan la prestación de nuevos servicios. Estos nuevos sistemas siguen la evolución de los servicios de telecomunicación y de los requisitos de éstos en términos de movilidad, bidireccionalidad y ubicuidad.

En la Tabla 27, [44] [46], se recogen las órbitas más utilizadas para satélites de comunicaciones y sus características. Como ya se ha citado, las órbitas LEO y MEO reducen los retardos de comunicación y pueden dar cobertura polar, aunque requieren gran número de satélites para proporcionar cobertura global (constelaciones de satélites) complicando y encareciendo la red.

También se utilizan órbitas específicas como son las elípticas de alta inclinación y excéntricas para coberturas de zonas de latitud elevada (*High inclined Elliptical Orbit*, HEO), por ejemplo la Molniya utilizada en Rusia.

Tabla 27. Tipos de órbitas y características principales

Tipo de Órbita	Altitud (sobre superficie terrestre, km)	Número de Satélites (cobertura global)	Retardo de Comunicación (ms)
LEO	200 - 3.000	60 - 90	20 - 40
MEO	3.000 - 11.000	8 - 12	50 - 150
HEO	Hasta 40.000	----	variable
GEO	35.786	3	250

En cuanto a las bandas de frecuencia, las más significativas son las mostradas en la Tabla 28, [45] [47]. Además de las indicadas en dicha tabla, hay bandas adicionales asignadas a comunicaciones militares, banda X (8/7 GHz), enlaces entre satélites y nuevos servicios de banda ancha, banda V (50/40 GHz), etc.

Tabla 28. Bandas de frecuencia y servicios para satélites de comunicaciones

Banda	Enlaces satélite (GHz)		Antena típica (m)	Servicio por satélite
	Ascendente	Descendente		
L	1,626-1,66	1,53-1,559	Terminales de mano	Móviles (MSS)
S	2,655-2,69	2,5-2,655	Terminales de mano	Móviles (MSS)
C	5,725-7,075	3,4-4,2 4,5-4,8	2,4 m	Fijo (FSS) (Telefonía, TV y datos)
Ku	12,75-13,25 14-14,8 17,3-18,1	10,7-12,75	1 m	Fijo (FSS) y Difusión (BSS) (Telefonía, TV DTH y datos)
Ka	27,0-31,0	18.1-21.2	< 0,6 m	Fijo (FSS) y Relay de datos (servicios de banda ancha)

2.5.1.2 Nuevos sistemas, nuevos servicios

Desde hace años se emplean satélites para distribuir programas de TV directamente a los usuarios en banda Ku, equipados con antenas bastante pequeñas (ej. entre 60 y 90 cm). Estos sistemas se denominan DTH (*Direct To Home*). La introducción de un canal de retorno terrestre, en un principio por módem telefónico, ha permitido prestar servicios interactivos. En los sistemas de TV digital por satélite, parte de la capacidad puede utilizarse para acceso a Internet sustituyendo flujos de vídeo por flujos de paquetes IP, de forma similar a la combinación de servicios de TV e Internet sobre redes de cable.

Con la reducción de coste de los terminales, los servicios de comunicación bidireccional a través de satélite tienden a extenderse hacia empresas pequeñas y usuarios residenciales y aparecen estándares para acceso directo bidireccional a Internet a través del satélite como el DVB-RCS (*Digital Video Broadcast – Return Channel by Satellite*). Esta es una línea importante de evolución en comunicaciones por satélite por la introducción del canal de retorno en el mismo satélite y, además, porque en el año 2006 se planteó extender el estándar DVB-RCS a escenarios móviles, empezando a desarrollarse el denominado modo móvil, DBV-RCS+M [48] [49].

A partir de finales de la década de los 90 se empezaron a introducir los sistemas de difusión de radio digital, para dar servicio en amplias zonas de cobertura a receptores fijos y móviles, por ejemplo aviones, sin embargo después de una década este servicio no ha tenido gran éxito comercial.

En el ámbito del Servicio Móvil por Satélite, MSS, en los años 1980 y 1990 se propusieron varios sistemas basados en constelaciones de satélites en órbitas bajas (LEO) y medias (MEO) capaces de dar servicio de voz y datos a velocidades muy bajas (ej. 9,6 kbit/s) a terminales móviles. Estos sistemas se denominan GMPCS

(*Global Mobile Personal Communications by Satellite*). La Figura 61 muestra de forma esquemática una red LEO. Típicamente los enlaces con los terminales funcionan en las bandas L (1,6 GHz) o S (2,4 GHz), los enlaces con las estaciones terrestres en las bandas C o Ka y los enlaces entre satélites en la banda Ka. Cuando un terminal fijo en la superficie de la Tierra va a perder de vista al satélite que le atiende, la comunicación debe traspasarse a otro.

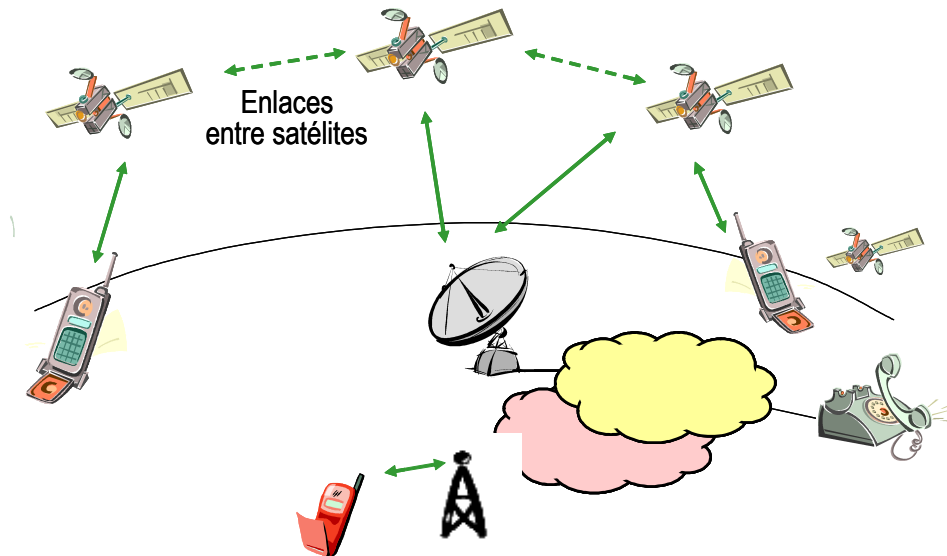


Figura 61. Constelación de satélites de baja órbita (LEO)

Además de reducir mucho el retardo de propagación, estos satélites LEO y MEO (Tabla 27), dada la banda de frecuencia utilizada, permiten usar terminales con una antena pequeña y sin necesidad de apuntarla al satélite, aunque sí es necesario tener línea de visión directa con él (no funcionan dentro de edificios). Debido a la competencia de las redes móviles terrestres, que cubren los mercados más lucrativos, las empresas que explotan este tipo de redes, después de pasar por diversos problemas financieros y procesos de bancarrota, compra y fusión, son pocas y se dirigen a un nicho de mercado caracterizado por requerir comunicaciones en zonas con poca o nula infraestructura, marítimas, etc. Ejemplos de este tipo de sistemas son Iridium y Globalstar.

Por otra parte, siguen desarrollándose sistemas basados en satélites GEO, inicialmente transparentes, para MSS. Inmarsat y Thuraya son sistemas de este tipo. Inmarsat, *the International Maritime Satellite Organization*, es el líder del mercado, creada en 1979, provee voz y datos a gran parte del globo, opera 10 satélites GEO, el último de ellos (Inmarsat-4 F3) lanzado en agosto de 2008. Thuraya lanzó el satélite Thuraya 3 en enero de 2008.

Se observan dos tendencias en la evolución de este tipo de sistemas que, en servicios, van hacia la prestación de servicios de acceso móviles, multimedia de banda ancha y, en particular, acceso a Internet con terminales fijos o portátiles. Una

línea de evolución se basa en la combinación de forma complementaria de sistemas de satélite transparentes con redes móviles terrestres de tercera generación, denominadas ATC (*Ancillary Terrestrial Component*). La otra tendencia, es la introducción de conmutación y/o procesado a bordo del satélite, es decir, la carga útil deja de ser transparente. En ambos tipos de sistemas predomina el uso de satélites GEO.

En cuanto a las soluciones MSS/ATC, potenciales competidores de los sistemas LEO, se esperaba que tuvieran gran actividad durante el año 2007 pero no ha sido así [50]. *ICO Global Communications*, que tiene autorización para operar un sistema de este tipo en Estados Unidos, lanzó el primer satélite GEO en abril de 2008 con este fin y *Mobile Satellite Ventures*¹⁹ estaba preparando, para Norte América, la nueva generación ATC ese mismo año. Un ejemplo de solución de red híbrida, es la basada en el estándar DVB-SH (*Digital Video Broadcasting-Satellite Services for Handheld*) [51] [52], para la prestación del servicio de difusión de televisión móvil desarrollado en Europa. Este sistema combina la red UMTS con el satélite utilizando espectro disponible en banda S.

La tecnología de conmutación y/o procesado a bordo del satélite se puede implantar en dos niveles de la carga útil:

- La conmutación de haces de cobertura muy pequeña (Figura 62), se realiza a bordo mediante una matriz de radiofrecuencia, generalmente en bandas Ku o Ka, utilizando la técnica de SS-TDMA (*Satellite Switched-Time Division Multiple Access*) y antenas multihaz [44].
- La conmutación o procesado en banda base, OBP en sus siglas inglesas (*On Board Processing*), consiste en demodular la señal recibida por el satélite, conmutarla con otras señales en banda base y volverlas a modular, combinadas convenientemente, para enviarlas de nuevo en el haz descendente adecuado [44] [53].

Estas técnicas permiten comunicar directamente de un terminal a otro en un único salto a través del satélite, en lugar de en dos saltos (terminal-satélite-estación terrestre central y retorno) reduciendo el retardo a la mitad, así como reutilizar frecuencias en diferentes zonas para aumentar la capacidad total del sistema (como en las redes celulares terrestres).

Además de los sistemas de comunicaciones basados en el concepto clásico de satélite, se han venido proponiendo a lo largo del tiempo otro tipo de sistemas basados en plataformas aéreas, los más representativos son las denominadas plataformas de gran altura (*High Altitude Platform*, HAP). Las HAPs son aviones no tripulados, quasi-estacionarios, y con gran autonomía, situados a alturas entre 15 y 22 km sobre la superficie terrestre. Se plantean para dar soporte de servicios de telecomunicación, complementarios tanto a sistemas satélite como terrestres, y para aplicaciones temporales o en regiones geográficas especiales. Aún no se explotan comercialmente [54] [55].

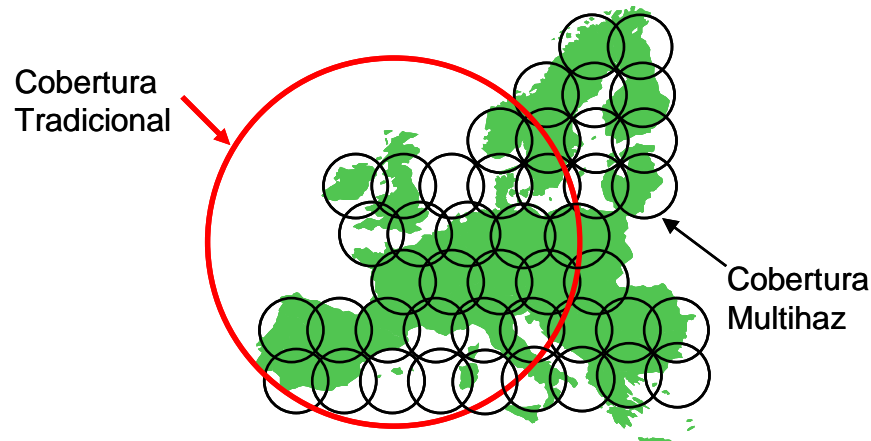


Figura 62. Comparación de zonas de cobertura

2.5.2 Estructura y elementos de red

Como se ha comentado en la sección anterior, la arquitectura de un sistema de comunicaciones por satélite consta de tres segmentos: espacial, control y terreno. En la Figura 63 se esquematiza la arquitectura genérica de este tipo de sistemas.

El acceso de los terminales al satélite se realiza utilizando diferentes técnicas de acceso múltiple para evitar interferencias entre ellos. Las más comunes son FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*) y CDMA (*Code Division Multiple Access*). En FDMA se asignan frecuencias portadoras diferentes a cada terminal, es la técnica más antigua, se utiliza en redes con relativamente pocos terminales y su eficiencia espectral no es muy alta.

En TDMA se asocia la misma frecuencia a un subconjunto de terminales, asignándose a cada uno periodos de transmisión fijos y sucesivos controlados por el NCC. TDMA es la técnica más utilizada. Existe una técnica mixta entre las dos anteriores en la cual a múltiples terminales se les asigna tanto múltiples frecuencias de operación como múltiples periodos discretos de transmisión, esta técnica se denomina MF-TDMA (*Multiple Frequency-TDMA*) que, por ejemplo, se utiliza en algunos satélites con procesado a bordo y en los nuevos estándares (DVB-RCS, ...).

Por último, CDMA es una técnica que se utiliza exclusivamente en comunicaciones digitales, en la que una señal con ancho de banda relativamente estrecho se modula con un código digital de banda ancha, resultando una señal a transmitir de banda muy ancha. En este caso los terminales se diferencian por los códigos, pudiendo transmitir con las mismas portadoras y simultáneamente. Esta técnica se utiliza en redes VSAT. Por otra parte, en el enlace descendente la transmisión del satélite es continua, existiendo también diversas técnicas para diferenciar las comunicaciones correspondientes a cada terminal.

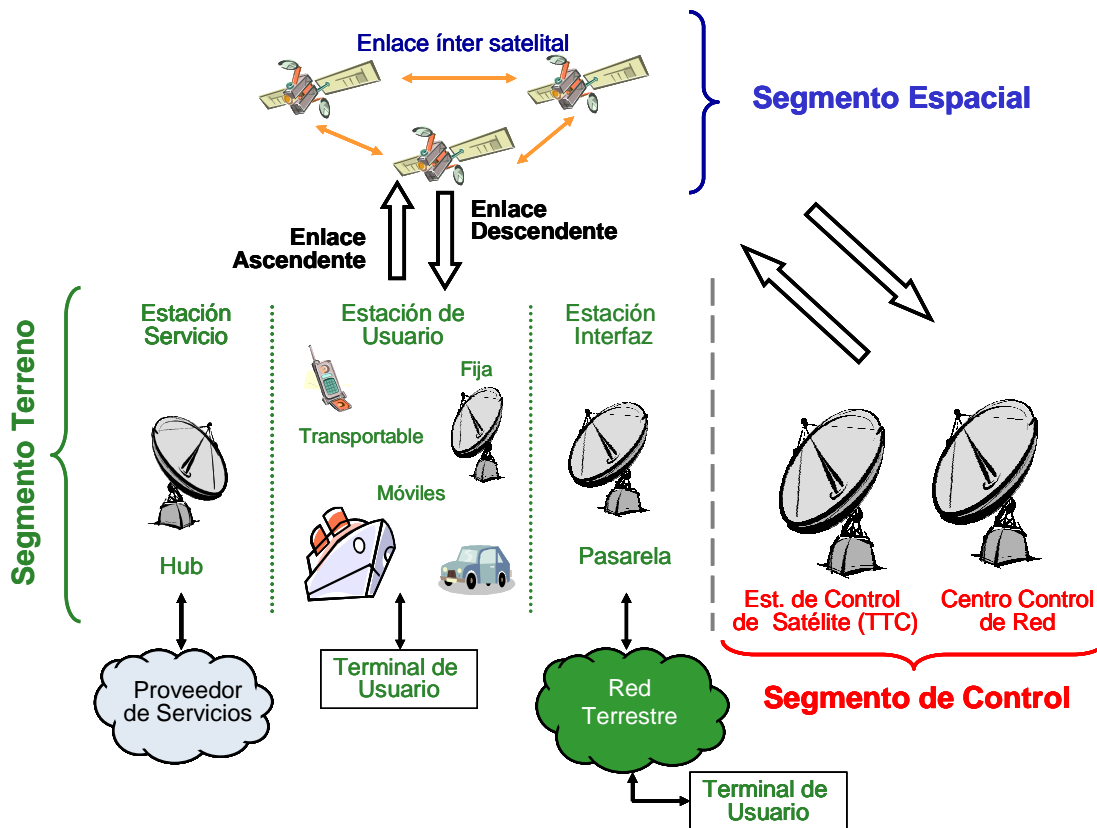


Figura 63. Arquitectura genérica de un sistema de comunicaciones por satélite

El detalle de la arquitectura difiere para cada tipo de servicio (fijo FSS, móvil MSS, *Broadcast* BSS), para cada tipo de sistema (GEO/N GEO) y, en cada caso, según criterios como la existencia o no de canal de retorno desde los usuarios hacia la red y del tipo de éste.

En función del canal de retorno desde los usuarios hacia la red se pueden distinguir tres tipos de estructuras:

- Unidireccionales, sin canal de retorno. Sólo permiten servicios unidireccionales, por ejemplo difusión de TV (Figura 64, usuario a).
- Híbridos, con canal de retorno a través de otra red diferente, por ejemplo red telefónica conmutada o red digital de servicios integrados. Permiten prestar servicios interactivos asimétricos, por ejemplo navegación por la Web para usuarios residenciales, (Figura 64, usuario b).
- Sistemas bidireccionales, con comunicación en ambos sentidos a través del satélite.

Los sistemas híbridos tienen como ventaja que los terminales son más baratos y pueden ser instalados por el propio usuario. Existen diversas formas de coordinar el canal descendente por satélite con el de retorno por la otra red, de forma que la

información que el usuario pide por el canal de retorno sea encaminada por el satélite [56].

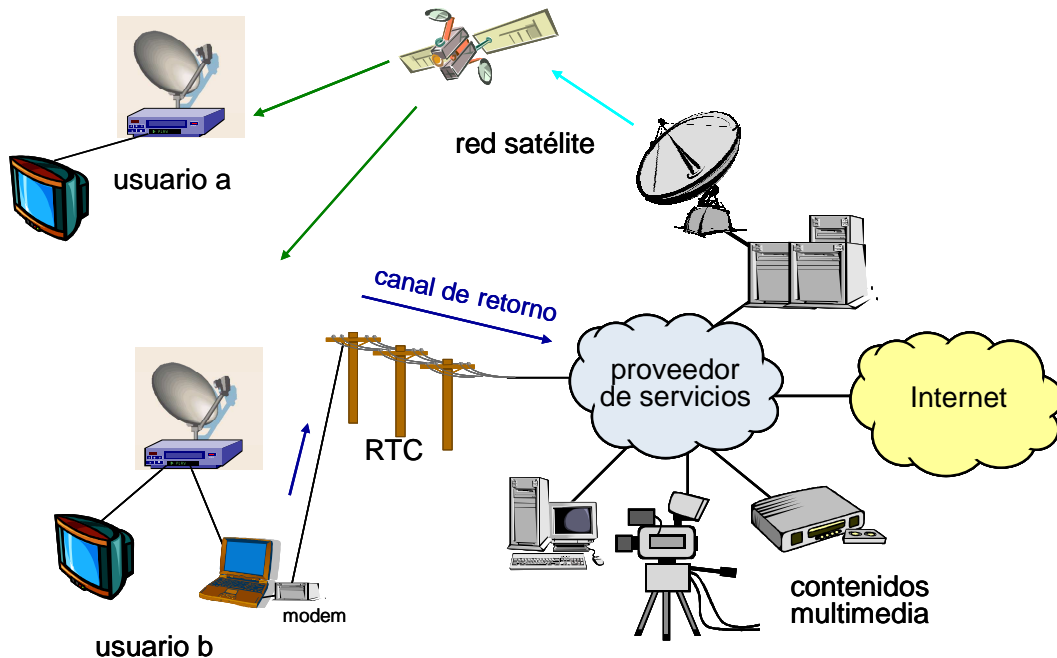


Figura 64. Red satélite híbrida

Los sistemas bidireccionales son soluciones tipo VSAT, citadas anteriormente (Figura 60), tienen la ventaja de que no dependen de otra red para el canal de retorno. En comparación con las redes híbridas, los terminales son más caros y usan antenas mayores al requerirse capacidad de transmisión directa al satélite, los terminales pueden ser transportables y, normalmente, la capacidad disponible en el sentido de bajada es mayor que en el de subida.

Típicamente los sistemas bidireccionales han estado más orientados al mercado de negocio, para crear redes privadas virtuales (VPN) para empresas con muchas sucursales, en particular si están situadas en áreas rurales, y a recuperación de comunicaciones en situaciones de emergencia. Sin embargo, se están extendiendo al mercado residencial en zonas rurales, con la aparición de soluciones, unas veces propietarias y otras estándares, para el canal de retorno y la evolución del coste de los terminales a la baja. Como ejemplo están los sistemas bidireccionales para usuarios residenciales que utilizan la misma antena para recepción de TV y para acceso a Internet, con coste y prestaciones comparables a otras soluciones de banda ancha. En edificios con instalación de antena colectiva puede instalarse una antena compartida para el canal de retorno vía satélite. Existen diversas empresas que dan servicios de VSAT, incluidos el mercado residencial, algunas de ellas son Spacenet, HughesNet e Hispasat. En España se utiliza este tipo de soluciones VSAT para dar

servicios de telefonía y acceso a Internet en zonas rurales donde no se pueden utilizar otras soluciones.

En comunicaciones IP, los paquetes IP pueden encapsularse sobre diferentes protocolos de nivel 2 para su transmisión por el enlace satélite. En el enlace descendente cada vez se impone más el empleo de los estándares de ETSI basados en los sistemas propuestos por *Digital Video Broadcast Project* (ver sección 2.5.3). DVB permite multiplexar a nivel 2 varios flujos de vídeo MPEG hasta una tasa aproximada de 60 Mbit/s según la modulación y codificación empleadas. Parte de estos flujos pueden sustituirse por paquetes IP según la mezcla de servicios de TV y de Internet que se desee [57] [58].

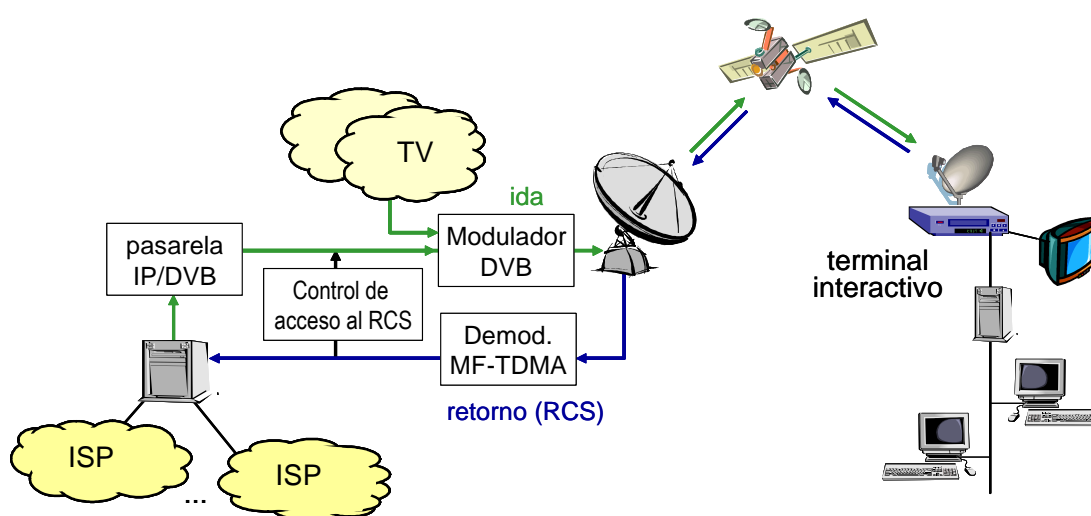


Figura 65. Ejemplo de sistema DVB-RCS

Para el canal de retorno, aparte de diferentes soluciones propietarias, el estándar DVB-RCS (*Digital Video Broadcast – Return Channel by Satellite*) ofrece una solución normalizada para integrar el canal de retorno en la red satélite [59] [60]. Esta solución está dirigida inicialmente a pequeñas empresas y posteriormente a usuarios residenciales, complementa, y a veces compite, con las redes de acceso terrestres como ADSL o redes de cable. Los sistemas DVB-RCS pueden funcionar en frecuencias de las bandas Ku o Ka. El usuario dispone de un encaminador IP y de un terminal satélite interactivo que se comunica a través del satélite con una estación central, a la que se conectan los proveedores de acceso a Internet y otros servicios. La estación central recibe el tráfico IP de los proveedores y lo envía a los terminales encapsulado sobre DVB como ya se ha mencionado. El canal de retorno DVB-RCS usa MF-TDMA. La estación central coordina el acceso de los terminales que solicitan transmitir por el canal de retorno (Figura 65).

DVB-RCS también se ha desplegado en sistemas mallados con conectividad directa terminal-a-terminal, sin pasar por un *hub* o estación central, utilizando satélites con

2.5.3 Normalización

Dadas las características peculiares de los enlaces por satélite, la normalización de los protocolos, desde nivel físico a capas superiores, ha sido un elemento clave en la difusión y utilización global de las comunicaciones por satélite. Existen numerosas organizaciones en el mundo dedicadas a la estandarización de este tipo de comunicaciones, como son ETSI, TTA, IETF y UIT.

ETSI ha realizado un gran esfuerzo para la estandarización de las comunicaciones por satélite en general y, en particular, en la difusión del acceso de banda ancha a Internet y establecer los protocolos DVB-S y S2/DVB-RCS como estándares. Para ello se ha apoyado en la infraestructura del proyecto DVB (*Digital Video Broadcasting*) [61]. El consorcio DVB, creado en 1993, está participado por 280 miembros entre operadores, fabricantes, proveedores de servicios, reguladores y otras entidades, define estándares para TV digital y servicios de datos. En la Tabla 29 se recogen algunos de los estándares más representativos de ETSI. Para más detalles referirse a la sección de estándares de dicho organismo [62].

DVB-S (EN 300 421), constituyó la primera generación de estándares de difusión de televisión digital, emplea compresión de audio (MPEG Layer 2) y de vídeo (MPEG-2). DVB-S2 (EN 302 307), la segunda generación, hace uso de las últimas técnicas de modulación y codificación para ofrecer el rendimiento que se acerca al límite teórico de estos sistemas. DVB-S2 no reemplazará DVB-S en el corto o incluso medio plazo, pero hace posible la prestación de servicios no desplegados con DVB-S.

Por ejemplo, en Europa, un número importante de radiodifusores por satélite utiliza DVB-S2 junto con MPEG-4 para dar servicios de HDTV. En ambos casos DVB encapsula la información en paquetes de transporte MPEG-2 (*MPEG-2 Transport Stream*, ISO/IEC 13818-1) [63], lo que permite aplicarlo tanto a servicios de TV como a servicios multimedia interactivos.

DVB-RCS (EN 301 790) es una norma técnica que define una completa especificación de interfaz aire bidireccional de banda ancha por satélite para sistemas VSAT de bajo costo. DVB-RCS proporciona a los usuarios el equivalente a las tecnologías ADSL o HFC para la conexión a Internet, sin necesidad de infraestructura terrestre local.

DVB ha aprobado la especificación DVB-RCS + M (draft EN 301 790 V1.5.1 - DVB-RCS+M) para la prestación de servicio a móviles y a terminales nómadas, así como para conectividad directa de terminal a terminal (malla). A parte de DVB-RCS para los servicios interactivos, ETSI ha definido varios estándares sobre canales de retorno para arquitecturas híbridas por diferentes tipos de red, resumidos en la Tabla 29.

En los servicios relacionados con televisión hay que comentar que fuera de Europa, ETSI/DVB compite con otros estándares como el ATSC norteamericano y NHK japoneses, aunque DVB es el más implantado internacionalmente.

Tabla 29. Selección de estándares ETSI relativos al acceso por satélite

Estándar	Título	Tema
EN 300 421	Digital Video Broadcasting (DVB) ; Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services	DVB-S (Transmisión)
TR 101 198	Implementation of Binary Phase Shift Keying (BIT/SK) modulation in DVB satellite transmission systems	
EN 302 307	Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications	DVB-S2 (Transmisión)
TR 102 376	User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications	
TS 102 441	DVB-S2 Adaptive Coding and Modulation for Broadband Hybrid Satellite Dialup Applications	
EN 300 473	DVB Satellite Master Antenna Television (SMATV) distribution systems	DVB-CS (Transmisión)
TS 101 964	Control Channel for SMATV/MATV distribution systems; Baseline Specification	
TR 102 252	Guidelines for Implementation and Use of the Control Channel for SMATV/MATV distribution systems	
TS 102 585	System Specifications for Satellite services to Handheld devices (SH) below 3 GHz	DVB-SH (Transmisión)
EN 302 583	Framing Structure, channel coding and modulation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3 GHz	
A120 (dTS 102 584)	DVB-SH Implementation Guidelines	
EN 301 210	Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite	DVB-DNSG (Transmisión)
TR 101 221	User guidelines for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite	
EN 301 222	Co-ordination channels associated with Digital Satellite News Gathering (DSNG)	
ETS 300 802	Network-independent protocols for DVB interactive services	DVB Común (Interactividad)
ETS 300 801	Interaction channel through Public Switched Telecommunications Network (PSTN)/ Integrated Services Digital Networks (ISDN)	DVB-RCP (Interactividad)
EN 301 195	Interaction channel through the Global System for Mobile Communications (GSM)	DVB-RCG (Interactividad)
TR 101 201	Interaction channel for Satellite Master Antenna TV (SMATV) distribution systems; Guidelines for versions based on satellite and coaxial sections	DVB-RCCS (Interactividad)

EN 301 790	Interaction channel for Satellite Distribution Systems	DVB-RCS (Interactividad)
TR 101 790	Guidelines for the Implementation and Usage of the DVB Interaction Channel for Satellite Distribution Systems	
TS102 550-551	Satellite Digital Radio (SDR) Systems ; Outer & Inner Physical Layer of the Radio Interface	Radio Digital
TS 102 292	Broadband Satellite Multimedia (BSM) ; Functional architecture for IP interworking with BSM networks	BSM
TR 101 984	Services and Architectures	BSM
TS 102 460	Address Management at the SI-SAP	BSM
TS 102 461	Multicast Source Management	BSM
TS102 462-464	QoS	BSM
TS102 465-466	Security Architecture	BSM
TS 102 429	Regenerative Satellite Mesh - B (RSM-B); DVB-S/DVB-RCS family for regenerative satellites; Parts 1 to 4	BSM
TS 102 442	Satellite Component UMTS/IMT-2000 ; Multimedia Broadcast/Multicast Services; parts 1 to 6	UMTS/IMT2000
TS 101 851	G-family parts 1 to 6	UMTS/IMT2000
TR 101 865	General aspects and principles	UMTS/IMT2000
TR 101 866	Analysis and definition of the Packet Mode	UMTS/IMT2000
TR 102 058	Evaluation of the W-CDMA UTRA FDD as a Satellite Radio Interface	UMTS/IMT2000
TR 102 061	Detailed analysis of the packet mode for the SW-CDMA (Family A):	UMTS/IMT2000
TR 102 277	W-CDMA Radio Interface for Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS)	UMTS/IMT2000

Dentro de ETSI, existen diversos comités técnicos, ETSI SES (*Satellite Earth Stations & Systems*) es el responsable de todo tipo de servicios de comunicación por satélite, incluyendo servicios fijos (ej. VSAT), de difusión, de banda ancha, móviles, parte satélite de UMTS, terminales de usuario y estaciones terrestres, en particular se centra en la especificación de interfaces de radiofrecuencia e interfaces con otras redes. El grupo SES colabora con otros comités técnicos ETSI, como MSG (*Mobile Standards Group*) con actividades relacionadas con la estandarización de todo lo relativo a comunicaciones móviles, y el ERM (*Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters*), grupo horizontal de ETSI sobre cuestiones de espectro y compatibilidad electromagnética. Así mismo, a parte de con el DVB, tiene relaciones con otros organismos como UIT-R, sector de Radiocomunicaciones de la UIT, y con grandes operadores de redes por satélite como Intelsat, Inmarsat y Eutelsat.

ETSI está contribuyendo a la especificación de los componentes satélite de UMTS/IMT-2000, familia de tecnologías definida por la UIT para la 3ª Generación de servicios móviles. ETSI se centra en garantizar que el componente satélite puede

trabajar directamente con otras redes UMTS y garantizar la compatibilidad de los servicios incluyendo, en particular, Multimedia *Broadcasting* / Servicio *Multicasting* (MBMS).

Además de ETSI en Europa, está también en Norteamérica la Asociación de la Industria de Telecomunicación (TIA) que ha estandarizado los esquemas de transmisión ATM vía satélite. Por otra parte, el IETF ha investigado sobre la aplicación de TCP para enlaces satelitales mediante el grupo de trabajo sobre el Protocolo de Control de Transporte para satélite (TCPSAT). En la Tabla 30 se citan las RFCs relativas al uso de TCP sobre canales satélite, el uso de PEPs (*Performance Enhancing Proxies*) que modifican el funcionamiento del protocolo sobre el enlace satélite (ver la sección 2.5.5) y el impacto de los errores de transmisión sobre las prestaciones extremo a extremo.

Tabla 30. Documentos de IETF relativos al uso de TCP sobre enlaces satélite

RFC	Fecha	Tipo	Título
2488	Enero 1999	Best Current Practice	Enhancing TCP Over Satellite Channels using Standard Mechanisms
2760	Febrero 2000	Informational	Ongoing TCP Research Related to Satellites
3135	Junio 2001	Informational	Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations
3155	Agosto 2001	Best Current Practice	End-to-end Performance Implications of Links with Errors

Por último, la UIT tiene una importante función reguladora que se detalla en la sección 2.5.7 y publica recomendaciones relativas a las comunicaciones por satélite, agrupadas en Series relativas a servicios concretos, por ejemplo, la Serie S sobre Servicio Fijo, la SNG sobre Periodismo Electrónico por Satélite (*Satellite News Gathering*), la BO de Distribución por Satélite, etc. Por otra parte ambos sectores de la UIT, Telecomunicación y Radio, estudian los estándares de acceso a Internet por satélite así como, por ejemplo, el papel de los satélites en la nueva generación de redes [64]. En la Tabla 31 se incluyen algunos ejemplos de las recomendaciones implicadas.

Tabla 31. Ejemplo de recomendaciones de UIT-R relativas a transmisión de paquetes y satélite

Recomendación	Título
UIT-R S.1420	Calidad de funcionamiento del modo de transferencia asíncrono en la red digital de servicios integrados de banda ancha por satélite
UIT-R S.1424	Objetivos de disponibilidad para trayecto digital ficticio de referencia utilizado para la transmisión del modo de transferencia asíncrono de la RDSI-BA en el servicio fijo por satélite por los sistemas de satélites de órbita geoestacionaria que utilizan frecuencias inferiores a 15 GHz

UIT-R S.1709	Características técnicas de las interfaces radioeléctricas para sistemas mundiales de comunicaciones por satélite en banda ancha
UIT-R S.1711	Mejoras en el comportamiento del protocolo de control de transmisión (TCP) por redes de satélite
UIT-R S.1806	Objetivos de disponibilidad para trayectos digitales ficticios de referencia en el servicio fijo por satélite que funcionan por debajo de 15 GHz

2.5.4 Madurez de la tecnología y del mercado

Dada la diversidad de sistemas de comunicaciones por satélite en cuanto a servicios y tipos de satélites, tanto los grados de madurez de la tecnología como los de mercado son muy diversos.

Los satélites geoestacionarios con terminales fijos se han utilizado durante décadas y actualmente la tecnología es muy fiable, la mayoría de estos satélites en servicio embarcan transpondedores transparentes.

Varios de los satélites GEO que iniciaron su desarrollo alrededor del año 2000, lanzados a mitad de la década y años sucesivos, así como algunos de los satélites no geoestacionarios actuales, incluyen conmutación a bordo. Hay diversos ejemplos a nivel mundial, unos experimentales y otros ya comerciales [65]. Hot Bird 4 (HB4) de Eutelsat, uno de los operadores líderes europeos, construido en colaboración con la ESA, embarcaba un multiplexor digital experimental Skyplex. El grupo Hispasat, la ESA y el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) han trabajado conjuntamente en el desarrollo del sistema de comunicaciones multimedia Amerhis [66], embarcado en el satélite Amazonas 1 lanzado en agosto de 2004. La carga útil incorpora el primer sistema de procesamiento a bordo de señales basado en el estándar abierto DVB-S/DVB-RCS. Esta plataforma provee acceso a Internet a alta velocidad con transmisión bidireccional de datos, voz y vídeo en Brasil y el resto del continente americano a través de conexión segura, con velocidades de transmisión de hasta 2 Mbit/s en el enlace de retorno y de 6 Mbit/s en la descarga, y da soporte a prácticamente todas las aplicaciones IP.

Otro ejemplo es Spaceway3 de Hughes, uno de los líderes mundiales en redes VSAT [67], esta nueva plataforma de banda ancha por satélite constituye la base para la próxima generación de servicio de HughesNet. El satélite Spaceway 3 fue lanzado el 14 de agosto de 2007 y el servicio comercial en América del Norte comenzó el 8 de abril de 2008. Opera en banda Ka, emplea procesamiento digital a bordo de alto rendimiento, conmutación de paquetes (capacidad de 10 Gbit/s) y tecnología de antenas multihaz que permite conectividad directa entre terminales desde de 512 kbit/s hasta 16 Mbit/s.

Existen numerosos operadores y proveedores de servicio satélite. En [68], estudio editado por Euroconsult, consultor especializado en este sector, se presenta un análisis muy completo y detallado de este mercado así como de su evolución hasta 2017. Este estudio se centra principalmente en los servicios fijos y de difusión de televisión, proporcionando información sobre los operadores más importantes: 38

de FSS y 25 de difusión de TV. Algunas de las conclusiones más relevantes de este informe se incluyen a continuación:

- El crecimiento del mercado fijo por satélite ha mantenido su buen ritmo durante el año 2007. Ha venido impulsado en particular por el entretenimiento digital y los nuevos mercados digitales. La aceleración del despliegue de redes corporativas, las comunicaciones militares y el despegue del acceso de banda ancha también han contribuido a dicho crecimiento. El sector fijo por satélite creció tanto en términos de demanda de transpondedores (+8%), como en ingresos (+9,5%) en 2007 respecto al año anterior, alcanzando unos ingresos de 8,9 billones de US\$.
- La demanda de capacidad de satélite para la televisión digital se aceleró aún más que el año anterior, debido a la implementación de nuevos estándares y de los canales de alta definición. La utilización de capacidad para servicios de televisión aumentó en un 13%, superando los 21.000 canales de radiodifusión por satélite.
- Los operadores regionales representan una amenaza creciente para los operadores globales (tales como SES, Intelsat, Eutelsat y Telesat), por su firme posición en el mercado y las relaciones con los clientes. Los operadores regionales representaron el 31% del total de ingresos del mercado en 2007, que generaron el 37% de los ingresos netos de crecimiento para la industria.
- El mercado de acceso de banda ancha por satélite llegó a casi 1 millón de abonados a finales del 2007, gracias en parte a la disponibilidad de los nuevos satélites con cobertura multihaz. Se espera que este mercado evolucione mucho entre 2008 y 2011 con la entrada en funcionamiento de diversos satélites en banda Ka en 2011 en América del Norte, Europa, Medio Oriente y África del Norte.

En el mercado de difusión de televisión, SES Astra es el líder de difusión de TV directa al hogar (DTH) por satélite en Europa. La flota de satélites en 2008 comprendía catorce Astra y dos Sirius. El sistema en conjunto proporcionó en 2007 servicios de TV y radio directamente a más de 50 millones de hogares, transmitiendo un total de 2.433 canales analógicos y digitales de televisión y radio. SES Astra también ofrece acceso por satélite a servicios multimedia, Internet y servicios de telecomunicaciones a empresas y diversos organismos. En cuanto a distribución a operadores de radiodifusión, en 2008 ha provisto 46 canales de alta definición (HD). SES Astra es una compañía del grupo SES. SES tiene una flota de 38 satélites en 25 posiciones orbitales alrededor del globo. Sus ingresos recurrentes superaron los 1.185 millones de € al final del tercer trimestre de 2008, un 7.1% superiores al año anterior.

Por otra parte, los servicios de TV móvil por satélite se comercializarán en breve. SES y Eutelsat han formado una *joint venture*, denominada Solaris, con objeto de proveer radiodifusión de vídeo, radio, datos y servicios móviles interactivos a dispositivos móviles y receptores de vehículo. El satélite W2A, cuya carga útil funciona en banda S, se encuentra en construcción desde octubre de 2006 y su

lanzamiento está programado en 2009. Es la primera infraestructura de este tipo en Europa.

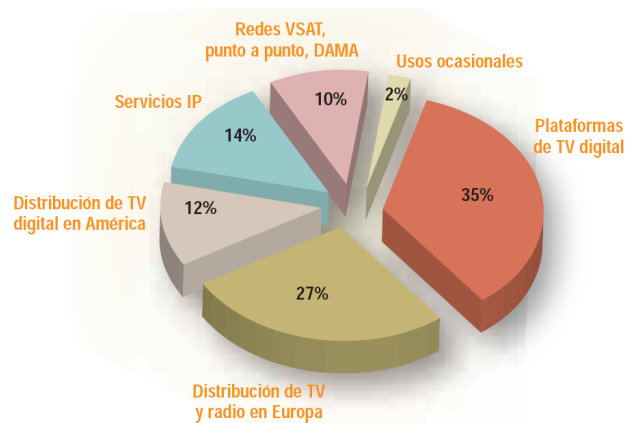
En cuanto al servicio fijo por satélite, FSS, esta liderado por Intelsat, Eutelsat, SES y Telesat. Intelsat es el mayor proveedor mundial de servicios fijos por satélite. Tiene una flota de 53 satélites y es propietario de siete telepuertos y de infraestructura terrestre. Ofrece servicios de vídeo, datos y conectividad de voz en aproximadamente 200 países y territorios con aproximadamente 1800 clientes corporativos, cubriendo el 99% de la población mundial. Sus ingresos ascendieron a 2.2 billones de US\$ en 2007 y a 1.756,1 millones de US\$ los nueve primeros meses de 2008, un 9% superior al mismo periodo de 2007.

El grupo europeo Eutelsat opera una flota de 24 satélites, 19 de los cuales son totalmente de su propiedad, y suministra capacidad a los operadores de servicios. Estos, a su vez, proporcionan a sus propios clientes servicios de radiodifusión, profesional de datos y soluciones de red de banda ancha de acceso a Internet. Eutelsat es uno de los líderes en Europa para vídeo y servicios de datos y uno de los tres primeros proveedores mundiales de servicios fijos por satélite (FSS). A 30 de junio de 2008 sus ingresos eran de 877.8 millones de € (año financiero 30 junio 2007-30 junio 2008).

Telesat, de Canadá, es el cuarto operador de FSS a nivel mundial, es un operador regional que da servicios en Norteamérica, dispone de una flota de quince satélites (Anik y Nimiq) en bandas C, Ku y Ka y explota otros trece satélites. A 30 de septiembre de 2008 sus ingresos consolidados eran de 504 millones de \$ canadienses (periodo de 9 meses).

Entre los sistemas regionales también hay que destacar Hispasat, ver la Figura 67, por su ámbito geográfico, con cobertura en América, Europa (cobertura especial en España) y norte de África. Incluye satélites colocados en tres posiciones orbitales: una posición transatlántica, 30° Oeste, en la que se ubican tres satélites, Hispasat 1C, 1D, y Spainsat; una posición americana, 61° Oeste, en la que se ubica el satélite Amazonas 1, y una posición oriental, 29° Este, en la que se ubica el satélite Xtar-Eur. El conjunto de satélites de comunicaciones civiles de Hispasat, operativos en 2008, embarcaban 84 transpondedores físicos en banda Ku y 29 en banda C. Hispasat es el operador de satélites líder en los mercados de habla española y portuguesa con unos 20 millones de usuarios entre España y América. Hispasat en 2007 fue el octavo operador del mundo por ingresos, alcanzando los 128,3 millones de € [69].

En cuanto a los sistemas de comunicaciones móviles por satélite el líder es Inmarsat que opera 10 satélites geoestacionarios, provee servicios civiles y gubernamentales móviles terrestres, marítimos y aeronáuticos (Tabla 32). A final de 2007 los ingresos de Inmarsat ascendieron a 576.5 millones de US\$ y los primeros nueve meses de 2008, a 30 de septiembre, a 474.1 millones.



Fuente: Hispasat

Figura 67. Distribución de usos del sistema Hispasat en 2007

En el ámbito regional, los sistemas GEO que proveen servicio MMS más destacados son: ACeS en el este de Asia, India, China y Australia, y Thuraya en Oriente Medio y partes de Europa del Este, Asia y África, *Mobile Satellite Venture* (actualmente SkyTerra), con los satélites AMSC y MSAT, en América del Norte, América Central, en el norte de América del Sur (Venezuela y Colombia), el Caribe y hasta 250 millas de la costa, y por último, NTT DoCoMo con el satélite N-Star en Japón.

Tabla 32. Servicios de Inmarsat

Móvil terrestre	Marítimo	Aeronáutico
		
BGAN Voz y datos de banda ancha simultáneos.	FleetBroadband Voz y datos de banda ancha simultáneos.	SwiftBroadband Voz y datos de banda ancha simultáneos.
IsatPhone Telefonía móvil por satélite.	Fleet 77, 55 and 33 Comunicaciones de voz, fax y datos.	Swift 64 Voz y datos a 64 Kbps.
LandPhone Telefonía fija por satélite para comunidades remotas.	FleetPhone Telefonía marítima por satélite.	Classic services Voz, datos de baja velocidad y comunicaciones de emergencia.
	Safety Comunicaciones de emergencia.	Safety Comunicaciones de emergencia.
	Crew calling Comunicaciones mar-tierra de bajo coste.	

Fuente: Inmarsat

Por otra parte, las redes de satélites de órbita baja (LEO) y media (MEO), operativas en la actualidad (Tabla 33) para dar servicios interactivos a terminales móviles sin los problemas de retardo de los satélites geoestacionarios, se dirigen a nichos de mercado muy específicos, en general, a usuarios sin acceso a otro tipo de comunicaciones.

En la actualidad se está desarrollando un nuevo sistema MEO en órbita ecuatorial, a 8.000 km. Su objetivo es dar servicio de *backhaul* inalámbrico a redes WiMax y móviles, redes troncales IP y acceso de banda ancha para PYMES en países en desarrollo para cubrir la brecha digital. Este sistema se denomina O3b (*“Other three billions”*) y se prevé que esté operativo en el año 2010 [70].

Por último, para ilustrar la tendencia en el mercado europeo, cabe resaltar que la Comisión Europea, con objeto de evitar la fragmentación del mercado interno, puso en marcha en Julio de 2008 un concurso para proveedores de servicios de comunicación móviles por satélite en toda Europa. Los operadores de satélites podrán ofrecer servicios tales como transmisión de datos a gran velocidad, televisión móvil, auxilio en caso de catástrofes y servicios médicos a distancia tras un único procedimiento de selección europeo en vez de 27 concursos nacionales distintos [71].

Tabla 33. Redes LEO en funcionamiento

Sistema	Nº de satélites	Altura (km)	Servicios	Mercado
Iridium	66	780	Voz 2,4 kbit/s Datos 2,4 kbit/s	>305.000 clientes (sept. 2008) Ingresos 260,9 millones \$ (Fin 07) Utilizado mayoritariamente por cuerpos de seguridad y del Ejército de EE.UU. y sus aliados.
Globalstar	48	1414	Voz 2,4 kbit/s Datos 9,6 kbit/s	Ingresos >98 millones \$ (Fin 07)
Orbcomm	29	775/ 739	Servicios de mensajería de banda estrecha (2,4 kbit/s)	Sin cobertura continua. Enfocado exclusivamente a comunicaciones Máquina-Máquina (M2M): 420.000 comunicadores (jun. 2008) Ingresos >6,6 millones \$ (Fin 07)

2.5.5 Prestaciones

Las prestaciones de las redes de comunicaciones por satélite dependen, en primer lugar, del servicio para el que fueron diseñadas, en segundo, del tipo de satélite y sistema (tipo de órbita, procesado a bordo, etc.) y, en cada uno de los casos, de los terminales. Para el servicio de difusión directa de televisión DTH, un ejemplo de prestaciones típicas es el satélite ASTRA 1L, lanzado en mayo de 2007, que

incorpora 29 transpondedores en banda Ku y 2 en Ka, con anchos de banda de 26 y 33 MHz y 500 MHz respectivamente, todos ellos protegidos contra eclipses, con una capacidad de 72 canales en banda Ku y 2 en Ka y cobertura en Europa.

Los terminales satélite móviles, de mano, ofrecen velocidades pequeñas para voz y datos, similares a las de GSM, por ej. 2,4 kbit/s ó 9,6 kbit/s. Los módem para terminales portátiles y su conexión a PC, proveen velocidades compatibles con GPRS y superiores. En la Tabla 34 se muestra un ejemplo de los servicios provistos por algunos de los operadores citados en párrafos anteriores.

Tabla 34. Ejemplo de servicios para terminales móviles y portátiles

Operador	Ejemplos de servicio	Ejemplos de tipo de terminal	Características (1)	Terminal	
				Tamaño (cm)	Peso
Inmarsat	BGAN: telefonía, estándar IP (correo, acceso Web,...), streaming IP y mensajería de texto	Wideye Sabre 1	Estándar IP: Hasta 240/384 kbit/s (envío / recepción) Streaming IP: 32 o 64 kbit/s (envío y recepción) garantizado Voz: via RJ-11 o terminal Bluetooth	25,9 x 19,5	<1,6 kg
		HNS 9201	Estándar IP: Hasta 492 kbit/s (envío y recepción) Streaming IP: 32, 64, 128 ó 256 kbit/s (envío y recepción) garantizado RDSI: 1 x 64 kbit/s Voz: via RJ-11 o terminal RJ-45 RDSI	34,5 x 27,5	2.8 kg
Globalstar	Telefonía Satélite / GSM / CDMA / AMPS Datos	SAT-550	Telefonía, buzón de voz, redireccionamiento de llamada SMS, e-mail, Internet hasta 9,6 kbit/s Satélite/GSM900	De mano	415 gr
Thuraya	Datos, Acceso a Internet, Streaming video,	ThurayaDSL	Módem IP. Hasta 144 kbit/s	30,5x24,5x4,5	1,6 kg con batería
		ThurayaIP	Módem IP. Hasta 444 kbit/s Streaming IP de 16-384 kbit/s garantizado	15,8x22,5x5	1,3 kg con batería

(1) Las velocidades indicadas son en canal compartido si no se indica lo contrario.

En cuanto al servicio fijo y, más concretamente, al acceso de banda ancha, es ofrecido por gran número de operadores de satélites de comunicaciones. Por ejemplo, Eutelsat en Europa provee servicios de acceso a Internet bidireccional por satélite con antenas entre 60 y 120 cm de diámetro, en bandas Ka y/o Ku, a través de proveedores de servicio. Su servicio D-STAR, sistema VSAT dirigido a ISPs y corporaciones, recibe un canal DBV *outband* de hasta 60 Mbit/s procedente del *hub* y

canales de retorno de los terminales de hasta 1,2 Mbit/s. Este servicio incorpora técnicas de turbo codificación de acuerdo al estándar DVB-RCS para el canal de retorno tanto de terminales como de *hub*. Para el mercado residencial Eutelsat ofrece el servicio *Tooway* que utiliza una adaptación al satélite del sistema DOCSIS de transmisión de datos de cable. *Tooway* proporciona diferentes velocidades máximas de servicio: 600/100 kbit/s, 1024/200 kbit/s ó 2048/384 kbit/s (enlaces descendente/ascendente). Este servicio también utiliza técnicas de aceleración, por ejemplo, de carga de páginas Web. Puede incorporar además servicio de televisión y de VoIP.

ASTRA también proporciona otros servicios de acceso fijo adicionales al servicio de televisión directa. Como ejemplo de prestaciones, el servicio ASTRA2Connect provee acceso a Internet hasta 2048 kbit/s en el enlace descendente y 128 kbit/s en el ascendente. ASTRA2Connect puede incorporar servicios de televisión, VoIP y contenidos bajo demanda.

En la Tabla 35 se incluyen otros ejemplos de servicios de acceso a Internet, en este caso proporcionados por HughesNet, muy extendidos en el ámbito rural estadounidense para entorno residencial y de pequeños negocios, que utilizan VSAT de menos de 1 m de diámetro.

Tabla 35. Ejemplo de servicios HughesNet para terminales fijos

Ejemplos de Servicio	Velocidad Máxima (1) Descendente (Mbit/s)/ Ascendente (kbit/s)	Velocidad Típica (2) Descendente (Mbit/s)/ Ascendente (kbit/s)
Home	1,0 / 128	0,55-0,65 / 70-80
Pro	1,2 / 200	0,7-0,8 / 100-120
ProPlus	1,6 / 250	0,8-1,0 / 130-150
Elite	2,0 / 300	1,0-1,2 / 165-180
Elite Plus	3,0 / 300	1,6-1,8 / 165-180
Elite Premium	5,0 / 300	2,7-3,0 / 165-180

(1) No garantizada

(2) En hora cargada

En el caso de implementación de VPNs, la velocidad de datos puede reducirse entre un 50 y un 70%. Hay que tener también en cuenta que estos servicios se basan en satélites geoestacionarios y no son adecuados para aplicaciones sensibles a retardos en los datos de usuario del orden de fracciones de segundos, por ejemplo, juegos on-line.

Por otra parte, según los estándares, las implementaciones de DVB-RCS pueden proveer de forma dinámica hasta 20 Mbit/s a cada terminal en el canal descendente y 5 Mbit/s en el ascendente, en canal compartido [58].

El protocolo de transporte utilizado puede limitar las prestaciones que obtiene la aplicación. El protocolo UDP puede funcionar sin cambios sobre enlaces satélite. Sin embargo, TCP suele necesitar ajustes para un adecuado funcionamiento de sus mecanismos de control de errores y control de congestión, debido a las particulares características de los enlaces por satélite: elevado producto retardo por ancho de banda, asimetría de capacidad entre los dos sentidos de la comunicación (normalmente mucho mayor en el canal de ida que en el de retorno) y tasa de errores potencialmente alta. Existen numerosos estudios del funcionamiento de TCP sobre satélite en la literatura técnica y propuestas para mejorar sus prestaciones, por ejemplo el uso de ventanas suficientemente grandes, asentimiento selectivo, compresión de cabeceras TCP/IP, etc. [44] [72] [73], según se ha explicado en la sección 2.5.3 y Tabla 30.

Una solución habitual es el empleo de PEPs (*Performance Enhancing Proxies*) que modifican el funcionamiento del protocolo sobre el enlace satélite. Una técnica utilizada, por ejemplo, es enviar asentimientos al extremo emisor antes de que los datos hayan llegado realmente al extremo receptor. Los PEP son aplicables también en otros casos donde la red presenta un tramo especialmente peor que el resto, por ejemplo en el acceso a través de redes locales inalámbricas (WLAN). Ver RFC 3135 en la sección 2.5.3.

En cuanto al nivel de aplicación, hay que reducir el número de accesos a través del satélite y mejorar el tiempo de respuesta ofrecido al usuario ya que, especialmente en satélites GEO, el acceso implica retardo. El mayor impacto será en las aplicaciones que necesiten muchas interacciones para transferir la información.

2.5.6 Adecuación a los servicios considerados

En general, la principal ventaja de las redes satélite es su capacidad de difusión eficiente de información en áreas muy extensas, permitiendo el acceso desde áreas rurales u otras donde no existen redes alternativas, con coste independiente de la distancia dentro de toda la zona de cobertura. Su principal limitación, en el caso de los satélites GEO, es el elevado retardo que agregado a otros retardos en redes terrestres puede afectar negativamente al funcionamiento de servicios interactivos. Las redes LEO eliminan el problema del retardo aunque, como se ha indicado anteriormente, se utilizan para nichos de mercado concretos y no de forma masiva. En la Tabla 36 se recoge una evaluación cualitativa de la adecuación de los dos grandes grupos de sistemas de comunicaciones por satélite, atendiendo a la órbita.

En dicha tabla se consideran los sistemas LEO orientados a telefonía, no aquellos diseñados para datos que no han llegado a ser operativos (por ejemplo EuroSkyWay, Skybridge, Teledesic, etc.). Hay que tener en cuenta, sin embargo, que los sistemas LEO son minoritarios frente a los GEO y que las nuevas generaciones de satélites GEO con procesado a bordo mejoran apreciablemente las prestaciones para este tipo de servicios.

Tabla 36. Adecuación de los sistemas de comunicaciones por satélite a los servicios de acceso considerados

Servicios	Tipo de Sistema	
	GEO	LEO
Telefonía	Adecuación media, se implementan mecanismos de cancelación de ecos para compensación de los elevados retardos de transmisión.	Adecuados, sistemas diseñados específicamente con este fin
<i>Streaming</i>	Adecuados para audio y para video a media/baja velocidad.	Adecuado para streaming de audio y, en el caso de vídeo, a muy baja velocidad.
Descarga entre pares (<i>Peer to peer</i>)	Adecuado para esta y otras aplicaciones de transferencia de archivos sin requisitos de retardo.	Permite acceso a Internet de muy baja velocidad, adecuación a esta aplicación dependiente de la velocidad requerida.
Juegos en red	Adecuación baja dados los retardos implicados en la comunicación.	Permite acceso a Internet de muy baja velocidad, adecuación baja a esta aplicación.
Difusión de TV	Especialmente adecuados para la distribución de TV por las capacidad / cobertura y escalabilidad que proporcionan	No aplicable
Video bajo Demanda	Adecuado por capacidad, limitado por granularidad.	No aplicable

A partir de las consideraciones expuestas, las redes satélite GEO se consideran más adecuadas para distribución de TV analógica y digital, así como para el establecimiento de redes privadas virtuales en el caso de empresas con muchas oficinas dispersas, en particular en áreas rurales.

También son adecuadas para acceso a Internet en general (correo electrónico, transferencia de ficheros, navegación por la Web, comercio electrónico, *streaming* de audio y video, etc.), en especial para aplicaciones que necesiten *multicast* (multiconferencia, descargas de software o de otros tipos de información a múltiples destinatarios, etc.), excluyendo las aplicaciones más interactivas (ej. juegos en red que necesiten un retardo pequeño), en este caso son más adecuados los sistemas LEO. En el mercado residencial, el acceso a Internet irá normalmente asociado a servicios de TV sobre el mismo equipo y usará cada vez más canales de retorno por satélite, o a través de una red terrestre (redes híbridas) por motivos de coste. Las nuevas generaciones de satélites GEO con procesado a bordo mejoran apreciablemente las prestaciones para este tipo de servicios.

Las aplicaciones de telefonía y videoconferencia son posibles como otra aplicación más sobre IP, desde terminales fijos y nómadas. En satélites GEO existe una potencial degradación de la calidad o de la interacción (efecto *walkie-talkie*) debido a las limitaciones de retardo y, en su caso, capacidad disponible desde el terminal hacia la red. La telefonía móvil por satélite es posible pero con un coste relativamente elevado, por lo que es más adecuada para usuarios de negocios y donde no exista cobertura de redes terrestres.

En cuanto a seguridad, el acceso al satélite plantea problemas similares a los de otras redes radio o de medio compartido, en particular en el enlace de bajada. Por ello, será necesario aplicar mecanismos generales de seguridad como cortafuegos, protocolos de seguridad (ej. IPsec, SSL), tarjetas inteligentes, etc. Como aspecto específico a tener en cuenta en este caso, los sistemas PEP de mejora de prestaciones pueden ser incompatibles con mecanismos de seguridad, por ejemplo cifrado extremo a extremo a nivel IP.

2.5.7 Aspectos regulatorios

En este punto nos centraremos en dos aspectos principales, los relativos al mercado de comunicaciones por satélite y los que conciernen a aspectos técnicos clave de dichos sistemas.

En cuanto al mercado está liberalizado, siguiendo la tendencia general de liberalización de las telecomunicaciones. Las organizaciones internacionales como Intelsat, Inmarsat o Eutelsat son privadas y, en general, el sector está actualmente abierto a la competencia. Sirva como ejemplo el caso de Intelsat, en junio de 2007, el fondo británico de inversión BC Partners adquirió el 76% de Intelsat, primer operador de satélites mundial con 51 satélites en explotación. La transacción fue valorada en 5.030 millones de US\$ y la deuda, asumida también por BC Partners y otros inversores, de 11.400 millones [74].

En Europa, la directiva 1994/46/CE introdujo la liberalización en el sector satélite. Sucesivamente la Comunidad ha editado varias directivas con implicaciones en el mercado de los servicios de comunicaciones electrónicas y, por tanto, al ámbito de los satélites de comunicaciones. Por ejemplo ya la directiva 2002/77/CE, relativa a la competencia en dichos mercados, indica en su artículo 7, para los satélites: “Los Estados miembros garantizarán la supresión de toda prohibición o restricción de la oferta de capacidad del segmento espacial a cualquier operador autorizado de redes de estaciones terrenas de comunicación por satélite y permitirán, dentro de su territorio, que todo suministrador del segmento espacial compruebe si la red de estaciones terrenas por satélite que vaya a utilizar en el segmento espacial se ajusta a las condiciones publicadas de acceso a su capacidad de segmento espacial”.

Desde el último paquete legislativo, que fue aprobado en 2002, la evolución del sector de las telecomunicaciones hace que el actual marco regulador necesite ser actualizado. Para tener en cuenta los cambios sectoriales, la Comisión puso en marcha una revisión de la actual reglamentación en noviembre de 2007. Las

propuestas de la Comisión para dicha reforma están pendientes de discusión y aprobación por la UE [75].

Entrando en el plano más técnico de las comunicaciones por satélite, dos son los aspectos básicos en los que incide la regulación: el uso del espectro radioeléctrico y las posiciones orbitales, ya que ambos son recursos escasos y cuya utilización tiene impacto a nivel mundial. La regulación de los satélites se coordina en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). La UIT-R, sector de radiocomunicaciones de la UIT, se encarga de regular el uso del espectro radioeléctrico y de órbitas de satélites, no sólo para servicios de radiocomunicaciones terrestres y por satélite, sino también para todo tipo de servicios (posicionamiento, meteorológicos, observación, investigación espacial). La UIT-R supervisa y facilita las complejas negociaciones intergubernamentales entre países soberanos con dicho fin. Para ello cuenta con varios grupos de estudio, por ejemplo el SG1 sobre gestión de espectro o el SG4 sobre servicios satélite, cuyo objetivo son los sistemas y redes para servicio fijo, móvil, difusión y radiodeterminación por satélite.

El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) es el documento en el que se recogen los acuerdos alcanzados. Este documento también detalla los procedimientos para solicitar frecuencias y órbitas. El RR sólo puede modificarse en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (*World Radio Communications Conference*, WRC), que organiza la UIT-R cada tres años. Cada WRC define la agenda de la siguiente WRC. La WRC se prepara por grupos de trabajo específicos a nivel nacional, regional y mundial.

Las organizaciones regionales responsables son la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) en Europa, CITEC para los países americanos y APT para los asiáticos. A nivel nacional, cada país tiene sus organismos internos reguladores que representan y defienden sus posiciones en la WRC; estos organismos también gestionan los planes de frecuencia, las licencias, etc, a nivel nacional. En España es la CMT, Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, el organismo encargado de estas funciones.

La última WRC se celebró en el año 2007, desde el punto de vista de comunicaciones por satélite los puntos abiertos para la discusión son los conflictos por uso del espectro, uno con el sistema de comunicaciones móviles IMT-2000, cuyas bandas candidatas afectan en gran medida a las bandas de frecuencia de satélite. Otro por el uso del espectro para televisión móvil, donde aparecen varios estándares que compiten, terrestre y vía satélite, con requisitos distintos en cuanto a ancho de banda.

El 7 de marzo de 2002 se aprobó el grupo de directivas actualmente aplicable, la directiva 2002/21/CE es el marco regulador común de las redes y servicios de comunicaciones electrónicas (directiva marco). En la misma fecha se adoptó la decisión 2002/676/CE sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea, de la Comisión Europea [76] y la sección "Normativa" de la CMT [11].

En España, la regulación general está contenida en la Ley General de Telecomunicaciones (Ley 32/2003, de 3 de noviembre). El Real Decreto 424/2005, de 15 de abril, aprueba el Reglamento sobre las condiciones para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas, el servicio universal y la protección de los usuarios (posteriormente modificado en Real Decreto 776/2006, de 23 de junio). La Orden Ministerial ITC/270/2007, del 1 de febrero de 2007, aprueba los modelos de solicitud de títulos habilitantes para el uso del dominio público radioeléctrico. Por último la Orden ITC/3391/2007, de 15 de noviembre, aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias (CNAF) [36], siguiendo los acuerdos y recomendaciones internacionales aplicables. La Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio se encarga de controlar el uso del espectro por los distintos servicios de radiocomunicaciones. Para más información sobre legislación referirse a la página Web correspondiente del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio [77], o a la ya citada de la CMT [11].

2.5.8 Escalabilidad

Como en otros sistemas inalámbricos, el despliegue de los terminales satélite es rápido. Una vez que se dispone de la infraestructura de acceso (el satélite o transpondedores alquilados, la estación de control y los accesos a otras redes), pueden instalarse terminales rápidamente en cualquier punto dentro de la zona de cobertura que tenga visión directa con el satélite. En las aplicaciones unidireccionales de difusión (p. ej. de TV) el número de usuarios es ilimitado, sin embargo, en los servicios bidireccionales el número de usuarios que se puede atender viene dado, en general, por la disponibilidad limitada de espectro en el interfaz radio, normalmente en el enlace ascendente donde incide, también, la posible limitación en potencia transmitida por el terminal, ya que se buscan terminales pequeños y baratos.

La capacidad y prestaciones de los satélites son muy variadas según su tipo. Los satélites de comunicaciones comerciales de las últimas generaciones típicamente incorporan transpondedores con anchos de banda entre 36 y 72 MHz en un número entre 30 y 60 para satélites entre 3 y 6 toneladas y potencias de 12 KW, pudiendo llegar los nuevos desarrollos de satélites a tamaños aún mayores. El número de transpondedores embarcados ha experimentado un incremento notable en los últimos años, sin embargo, simultáneamente existe una tendencia a ir a plataformas mas pequeñas, y menos costosas, que en muchos casos están en fases de experimentación [78]. Por ejemplo, Hispasat 1D, lanzado en 2002, incorporó 28 transpondedores con anchos de banda entre 33 y 72 MHz [66]. El satélite Amazonas 1, lanzado en 2004, incorpora 51 transpondedores físicos, de ellos 32 en banda Ku y 19 en banda C, que equivalen a 63 transpondedores de 36 MHz. 4 de ellos constituyen una carga útil con procesado a bordo basado en el estándar DVB-S/DVB-RCS. El satélite Amazonas 2, cuyo lanzamiento está previsto en 2009, ya incorpora 64 transpondedores físicos, 54 de ellos en banda Ku y 10 en banda C.

En cuanto a servicios móviles, cada satélite Inmarsat-4, tres satélites idénticos lanzados entre 2005 y 2008, ofrece una capacidad de 630 canales de 200 kHz en banda L [45], puede formar digitalmente más de 200 haces puntuales controlados por un procesador a bordo que dirige las señales hacia los diferentes haces y generar 19 haces de cobertura amplia.

Según [44], en la Figura 68 se muestra la evolución de la capacidad de los nuevos satélites en comparación con otros medios de transmisión, se ha supuesto que la capacidad sigue la misma tendencia en la red troncal y en el acceso. En dicha figura, 1ª G-Sat indica la primera generación de satélites que dan servicio de acceso Internet, desarrollados en el periodo de 2000-2010, con capacidades entre 5 y 50 Gbit/s. El satélite experimental KIZUNA (*Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite*, WINDS), de la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), lanzado en 2008, es un ejemplo operativo. El sistema KIZUNA tiene como objetivo velocidades máximas de 155 Mbit/s (recepción) y 6 Mbit/s (transmisión) para hogares, con antenas de 45 centímetros de apertura, y ultra-alta velocidad de 1,2 Gbit/s para oficinas con antenas de cinco metros [79].

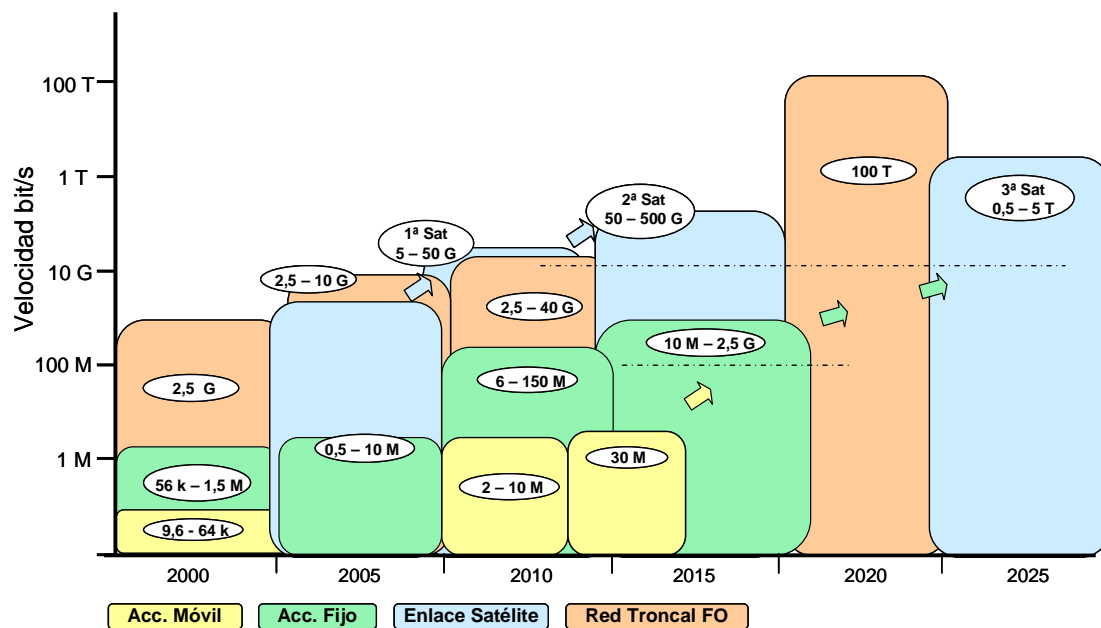


Figura 68. Previsión de las velocidades de transmisión para diferentes medios

En la Figura 68, ver [44], se asume un cambio de generación cada diez años, siendo 2ª G-Sat, de 2010-2020, y 3ª G-Sat, de 2020-2030, las generaciones sucesivas, alcanzando capacidades en los rangos de 50-500 Gbit/s y de 0.5-5 Tbit/s respectivamente.

2.5.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Los servicios de comunicaciones por satélite se basan en el establecimiento de enlaces radio entre terminales y satélite. Para el establecimiento de la comunicación el “balance de enlace” tiene que ser adecuado. Es decir, los niveles de potencia de señal transmitida por el terminal, niveles de ruido, atenuaciones, pérdidas y ganancias en diferentes puntos del trayecto de enlace, incluyendo la carga útil, tienen, en último término, que ser adecuados para permitir la recepción de la señal por el satélite. En el enlace descendente, satélite-terminal, deben cumplirse requisitos equivalentes. El enlace terminal-satélite necesita tener línea de visión directa, por lo que los terminales no pueden instalarse en lugares donde esta línea quede bloqueada por edificios u otros obstáculos.

En las bandas de frecuencia asignadas a los servicios por satélite (ver Tabla 28) la atenuación por lluvia tiene efecto de forma distinta, en general, aumenta a medida que la frecuencia aumenta. Eso ha hecho, junto a la facilidad de uso debido a una tecnología más simple, que las bandas de frecuencia L, S y C se hayan utilizado en primer lugar y estén ya saturadas. Las bandas Ku y Ka se ven más afectadas por el fenómeno de la atenuación debida a la lluvia.

Además hay otros efectos que disminuyen el nivel de señal o aumentan el ruido, empeorando el balance del enlace. Por ejemplo, pérdidas debidas a la absorción molecular por la presencia de gases en la troposfera, principalmente oxígeno y vapor de agua, que difiere de unas bandas de frecuencia a otras. En cuanto al ruido, hay fuentes de ruido externo como el ruido del cielo (ruido de fondo, del sol y de otros astros, etc.) y terrestres. El efecto del ruido externo depende de la ganancia que tenga la antena receptora en la dirección de procedencia de dicho ruido.

Un efecto específico de corte de comunicaciones ocurre cuando el Sol cruza el plano ecuatorial de la Tierra y queda alineado con el satélite y el haz de la antena de una estación terrestre. Esto provoca fuertes interferencias solares debido a la energía electromagnética emitida por el Sol en las bandas utilizadas por los satélites. El fenómeno es completamente predecible y se presenta dos veces al año, afectando a los satélites geoestacionarios, normalmente entre 5 y 8 minutos al día, durante el equinoccio de primavera (de finales de febrero a principios de marzo) y durante el de otoño (de finales de septiembre a principios de octubre) cuando el Sol está sobre el Ecuador.

En general los efectos citados se pueden cuantificar y se tienen en cuenta en la fase de diseño del sistema para asegurar los requisitos de disponibilidad del mismo. La UIT-R tiene publicados una serie de informes y recomendaciones para el cálculo de dichos efectos que sirven de base para el diseño. Por último, en lo referente a protección frente a emisiones radioeléctricas relacionadas con los sistemas de comunicaciones por satélite, se aplica la normativa general sobre limitación de emisiones citada en la sección 2.4.9.1, que incluye los Reales Decretos 1066/2001 [38] y 424/2005 [39].

2.6 Redes locales inalámbricas (WLAN)

2.6.1 Motivación original y evolución

Las redes locales inalámbricas o WLAN (*Wireless Local Area Network*) permiten la interconexión de ordenadores en área local como las LAN clásicas, pero sin necesidad de usar cables. Las WLAN funcionan en bandas de frecuencia que no requieren licencia de uso, por ejemplo en torno a 2,4 GHz, y pueden utilizarse de dos formas básicas:

- Para establecer redes ad-hoc, esto es, redes cerradas donde un grupo de terminales próximos se comunican entre sí sin acceso a redes externas, por ejemplo un grupo de usuarios en una sala de reuniones.
- Como redes de acceso inalámbricas donde uno o varios terminales se comunican con un equipo denominado punto de acceso, a través del cual pueden acceder a redes externas. Por ejemplo, acceso a Internet desde el hogar, oficinas y zonas públicas como aeropuertos, bibliotecas, hoteles, etc. donde existan WLAN instaladas (conocidas como *hotspots* en inglés).

En esta sección se considera la segunda forma de uso, esto es las WLAN como tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha. En los últimos años el acceso por WLAN se ha extendido notablemente, tanto en entorno profesional como residencial. A los usos iniciales, centrados en servicios de datos para ordenadores portátiles, se han añadido aplicaciones de voz sobre IP, vídeo, juegos, etc. utilizando todo tipo de terminales: ordenadores, agendas electrónicas, teléfonos móviles, consolas de juegos, etc.

En [80][81] se describen los requisitos a cumplir por las WLAN y se comparan varias alternativas de diseño que se barajaron antes de normalizar este tipo de redes. Aunque se propusieron otros estándares de WLAN [82][83], ha sido el IEEE 802.11 el que ha tenido mayor aceptación, hasta el punto de que “WLAN”, “802.11” y “Wi-Fi” (abreviatura de *Wireless Fidelity* que identifica a los equipos que implementan IEEE 802.11) se usan prácticamente como sinónimos.

El estándar IEEE 802.11 especifica las capas física y de control de acceso al medio de una WLAN. Tras las versiones iniciales de 802.11, publicadas en 1997 y 1999 para velocidades máximas hasta 2 Mbit/s, han ido apareciendo enmiendas o especificaciones adicionales que mejoran la velocidad de acceso, la seguridad, el soporte de calidad de servicio y otros aspectos de esta tecnología. Algunos ejemplos son: 802.11b (de 1999, hasta 11 Mbit/s), 802.11g (de 2003, hasta 54 Mbit/s) y 802.11i (de 2004, con mejoras de seguridad). Ver detalles en el apartado 2.6.3.

La nueva versión IEEE 802.11-2007 [84] incorporó en un solo documento el estándar básico y las enmiendas publicadas hasta esa fecha, mientras se seguía trabajando en otras en fase de borrador, por ejemplo la 802.11n para velocidades superiores a 100 Mbit/s.

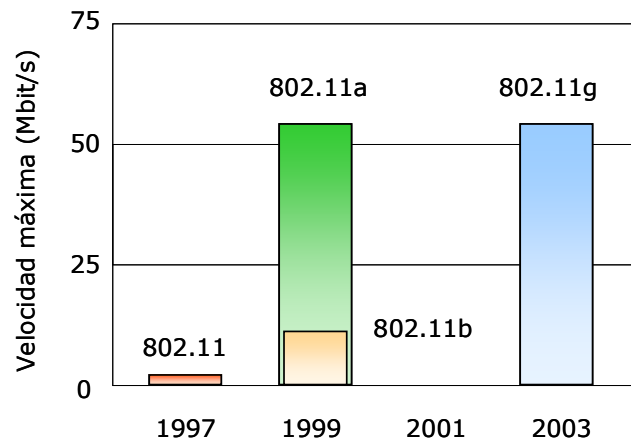


Figura 69. Velocidades máximas de las variantes de IEEE 802.11 hasta 2007

La disponibilidad de terminales y equipos de acceso 802.11 es muy amplia y su precio es asequible para todo tipo de usuarios. La Alianza Wi-Fi, asociación de la industria que cuenta con más de 300 miembros de 20 países, se encarga de probar los productos y certificar qué partes específicas del estándar 802.11 implementa cada uno. En el servidor Web de esta asociación [85] se mantiene una lista de productos certificados que superaba las 4000 entradas en 2008. Estos productos son de todo tipo, lo que muestra la gran difusión que está teniendo esta tecnología:

- Equipos de red: puntos de acceso, pasarelas,...
- Ordenadores portátiles y tarjetas adaptadoras de red, internas o externas, para conectar a ordenadores fijos
- Periféricos: discos duros externos, impresoras,...
- Agendas electrónicas (PDA)
- Teléfonos móviles solo Wi-Fi y teléfonos duales Wi-Fi/celular
- Cámaras fotográficas y de vídeo, reproductores MP3, consolas de juegos, televisores, proyectores multimedia, etc.



Figura 70. Logotipos de la Alianza Wi-Fi y de los productos Wi-Fi certificados

2.6.2 Estructura y elementos de red

Las redes locales inalámbricas se integran en una red IP de forma similar a las redes locales cableadas. Un acceso residencial tiene una configuración típica con un solo punto de acceso inalámbrico, que se comunica por un lado con los terminales existentes en el hogar y por otro se conecta al acceso a Internet de banda ancha, por ejemplo ADSL. Ver Figura 71. Con frecuencia, el mismo equipo que implementa las funciones de punto de acceso Wi-Fi integra también un encaminador IP con interfaces Ethernet (“router inalámbrico”) e incluso el módem ADSL.

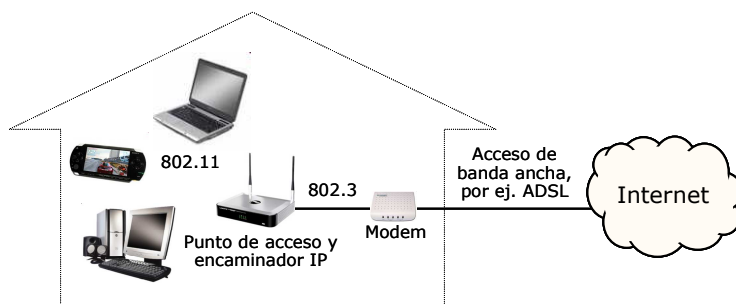


Figura 71. Acceso Wi-Fi residencial

En el caso de una WLAN que cubra un área más amplia, por ejemplo una zona de oficinas de una empresa, universidad, etc., será necesario desplegar varios puntos de acceso en lugares adecuados de la zona a cubrir. Ver Figura 72. La conexión entre los puntos de acceso y la red IP de la entidad de que se trate se puede hacer con cableado Ethernet.

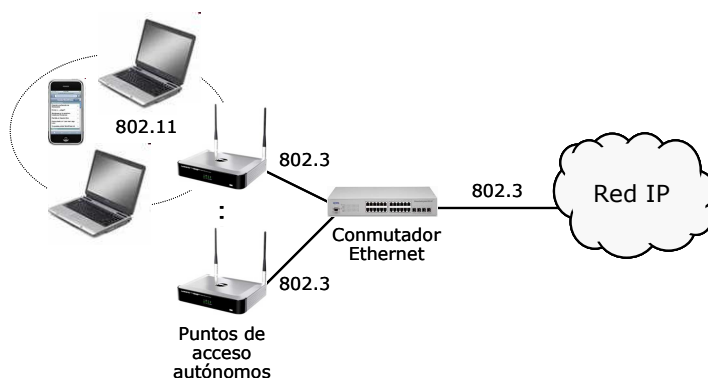


Figura 72. Red Wi-Fi con puntos de acceso autónomos

En esta configuración cada punto de acceso hace autónomamente todas las funciones de acceso inalámbrico incluidas en 802.11. Los fabricantes ofrecen también alternativas basadas en puntos de acceso más sencillos que solo implementan las funciones de más bajo nivel del acceso inalámbrico. El resto se implementa de forma centralizada en un controlador de puntos de acceso, que suele estar integrado en un conmutador Ethernet. Ver Figura 73.

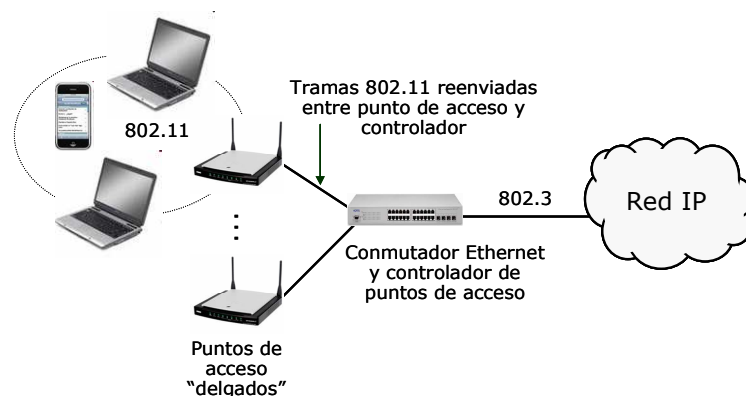


Figura 73. Red Wi-Fi con puntos de acceso dependientes de un controlador

En la arquitectura centralizada, los puntos de acceso simplificados se denominan puntos de terminación de WLAN o también “puntos de acceso delgados” (*thin access points*), por contraposición con los “puntos de acceso gordos” (*fat access points*) capaces de realizar todas las funciones del acceso inalámbrico sin depender de un controlador externo [86]. El reparto de las funciones 802.11 entre punto de acceso delgado y controlador puede hacerse de diferentes formas según el fabricante, lo que afecta al interfaz entre ambos y a la interoperabilidad de controladores y puntos de acceso. El IETF ha creado un grupo encargado de estudiar las arquitecturas de WLAN centralizadas y normalizar un protocolo para el interfaz citado que facilite la interoperabilidad. Este grupo se denomina capwap (*Control And Provisioning of Wireless Access Points*). Aunque el objetivo inicial es que la solución propuesta sea aplicable a las redes 802.11, y para ello el grupo capwap está coordinado con el grupo correspondiente del IEEE, se plantea la posibilidad de ampliarla más adelante para que pueda utilizarse con otras redes de acceso inalámbrico como WiMAX (ver sección 2.4).

Por otra parte, existen diferentes arquitecturas de red para interconectar WLAN con redes móviles. Ver Figura 74. De esta forma el usuario puede acceder a los servicios de su red móvil también desde terminales WLAN. Si el usuario dispone de un terminal dual puede utilizarlo para acceder directamente a la red móvil o a través de WLAN dependiendo de las coberturas disponibles, tipo de servicio, etc.

Las arquitecturas de interconexión se pueden clasificar en dos tipos según el interfaz del núcleo de la red móvil al que se conecta la WLAN. En el primer tipo, la WLAN se conecta al núcleo de red a través del mismo interfaz que la red de acceso radio del operador móvil (“acoplamiento fuerte”). En el punto de interconexión se conecta una pasarela que implementa los protocolos de acceso de la red radio, de forma que para el núcleo de red la WLAN se comporta igual que dicha red radio. En este caso, la movilidad de terminales de un punto de acceso WLAN a una estación base de la red móvil o viceversa se trata igual que la movilidad entre estaciones base dentro de la red móvil.

En el segundo tipo, la WLAN se conecta al núcleo de la red móvil como otra red externa más (“acoplamiento débil”). Esto evita utilizar una pasarela de adaptación a los protocolos de la red radio como en el caso anterior, pero a cambio dificulta el tratamiento de la movilidad de terminales a/desde la WLAN.

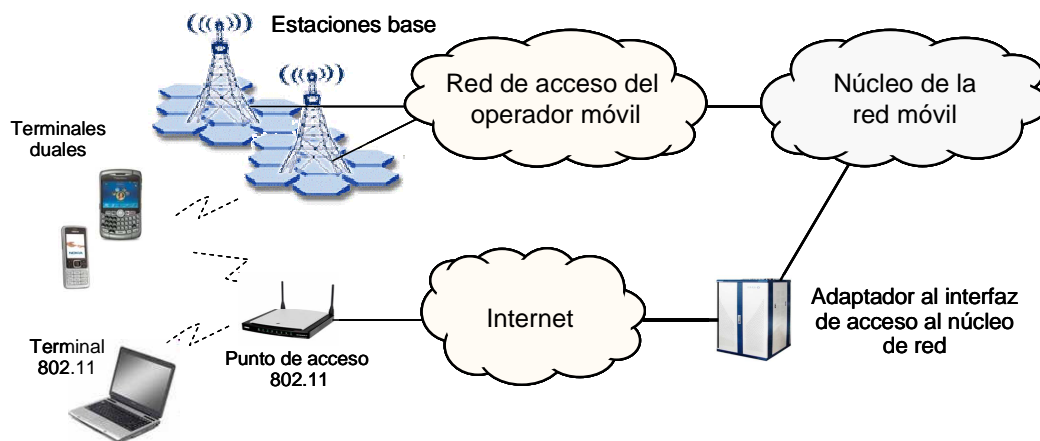


Figura 74. Arquitectura genérica de interconexión de WLAN y red móvil

2.6.3 Normalización

Los apartados siguientes describen los aspectos principales del estándar IEEE 802.11 con las enmiendas integradas en la versión de 2007 [84] y otras posteriores, presentadas en orden cronológico. En la Tabla 37 se muestra una clasificación de las mismas agrupadas por temas. También se incluyen apartados dedicados al estándar HIPERLAN/2 de ETSI y a los estándares de interconexión de WLAN con redes móviles.

Tabla 37. Estándares de la familia IEEE 802.11

Área	Incluidos en 802.11-2007	Posteriores
Aumento de velocidad	11b, 11a, 11g	11n
Operación en diferentes dominios regulatorios	11d, 11h, 11j	11y
Seguridad	11i	11w
Calidad de servicio y prestaciones	11e	11r, 11k, 11z, 11aa, 11.2*
Otras (redes malladas, interfuncionamiento,...)		11p, 11s, 11u, 11v

* 802.11.2 no es una enmienda al estándar, sino una especificación de prácticas recomendadas

2.6.3.1 IEEE 802.11-1999

El 802.11 especifica tanto el funcionamiento de varios terminales que forman una red inalámbrica ad-hoc como el denominado modo infraestructura, en el que los terminales se comunican entre sí y con redes externas a través de puntos de acceso. Al igual que otros estándares de redes locales y metropolitanas de la familia IEEE 802, el 802.11 abarca las capas física y de control de acceso al medio de la red de acceso.

La capa física permite transmitir a 1 ó 2 Mbit/s y puede usar técnicas de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) o por secuencia directa (DSSS) en la banda de 2,4 GHz. Adicionalmente se normalizó otra implementación de la capa física con las mismas velocidades de transmisión pero en la banda de infrarrojos, con longitudes de onda entre 850 y 950 nm. Esta tercera opción se diseñó para uso en interiores, a distancias máximas de 10-20 m y sin necesidad de visión directa (a diferencia de otros dispositivos que funcionan en infrarrojos y que necesitan ser apuntados hacia el receptor).

La capa de enlace lógico, situada sobre la anterior, está formada por el control de acceso al medio (MAC) específico de 802.11, que da servicio al control de enlace lógico (LLC) definido en IEEE 802.2. En capas superiores se usará normalmente el protocolo IP, más un protocolo de transporte y otros protocolos de extremo a extremo adecuados para las aplicaciones que quiera utilizar el usuario.

El MAC de 802.11 ofrece un servicio no orientado a conexión que permite enviar unidades de datos del servicio MAC a través del interfaz inalámbrico. Típicamente estas unidades de datos de servicio encapsularán paquetes IP. Inicialmente se definió una única clase de servicio (*best effort*) que luego se amplió con varios niveles de calidad de servicio como se explica más adelante. El estándar especifica dos tipos de acceso, denominados respectivamente DCF (*Distributed Coordination Function*) y PCF (*Point Coordination Function*). Ver Figura 75.

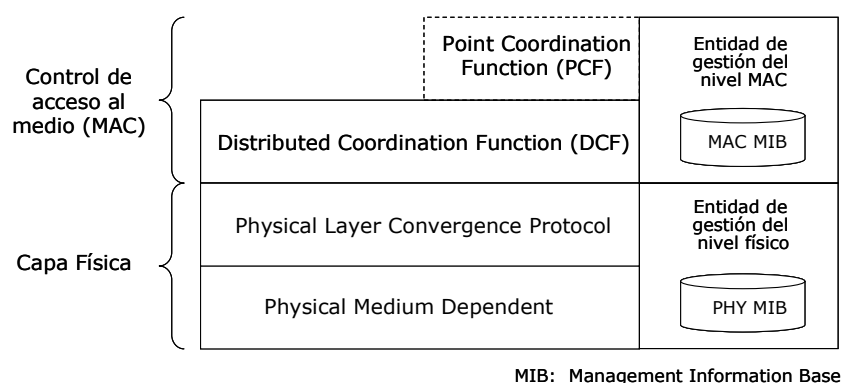


Figura 75. Elementos de IEEE 802.11

DCF usa un mecanismo de contienda. En la Figura 76 se muestra un ejemplo de envío de varias tramas. La estación A encuentra el canal radio libre y transmite

primero. Si vence un plazo sin recibir el acuse de recibo (*ack*) del destinatario, D en este caso, el emisor retransmitiría la trama tras una espera pseudoaleatoria. Tras el acuse de recibo de la trama de A, las estaciones B y C, que estaban esperando para enviar sus tramas, inician un tiempo de espera pseudoaleatorio. En este ejemplo, la espera de C resulta ser menor y transmite en segundo lugar. Seguidamente, B completa su tiempo de espera y transmite también.

PCF usa un mecanismo de sondeo, en el que los terminales transmiten por turnos bajo control del punto de acceso y se evitan las colisiones que pueden producirse con el método anterior. La modalidad de sondeo es opcional. Si se utiliza, los periodos de sondeo y de contienda se van alternando en el tiempo. Al enviar cada unidad de datos se indica a la capa MAC cuál de los dos métodos de acceso al medio se quiere utilizar. Ver detalles de DCF y PCF en [87].

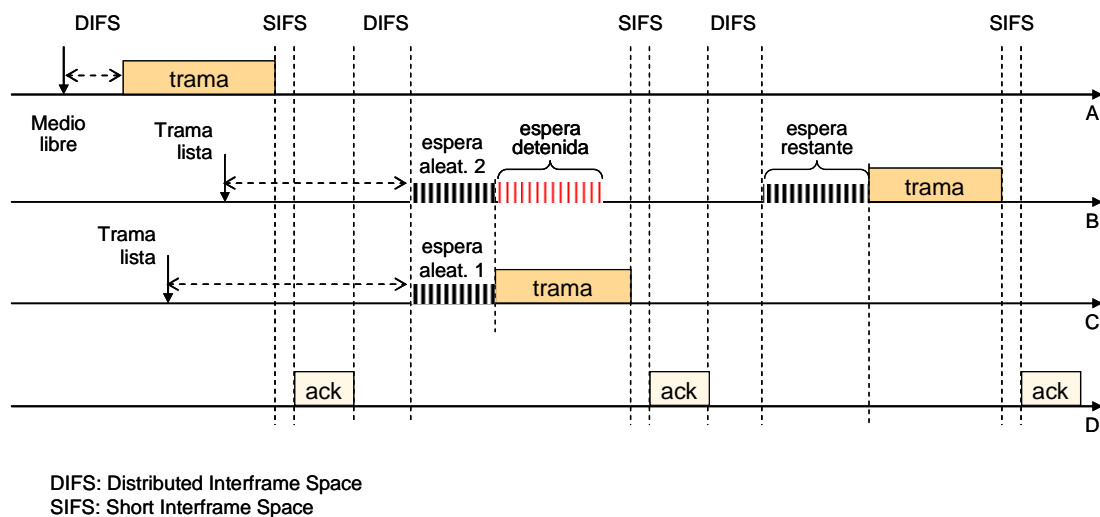


Figura 76. Ejemplo de acceso al medio por contienda (DCF)

Para ejecutar los procedimientos MAC los terminales y el punto de acceso intercambian una serie de tramas con formatos definidos en el estándar, que pueden ser de tres tipos:

- Tramas de datos, que contienen una unidad de datos de servicio MAC, o una parte de ella en caso de usar segmentación.
- Tramas de control, incluyendo, entre otras, los acuses de recibo.
- Tramas de gestión, que se usan para procedimientos como el descubrimiento de puntos de acceso por parte de los terminales y la autenticación entre terminales y puntos de acceso.

La especificación 802.11 incluye procedimientos de seguridad basados en una clave secreta configurada de antemano en el punto de acceso y los terminales. Esto permite cifrar las tramas con un algoritmo de cifrado simétrico para su envío confidencial por el interfaz radio. También se aplica control de integridad,

calculando una función resumen de cada trama enviada que sirve para detectar posibles alteraciones durante su transmisión. Antes del intercambio normal de tramas entre punto de acceso y terminal, se ejecuta el procedimiento de autenticación, que consiste en el envío de un reto (secuencia de bits pseudoaleatoria) al que se debe contestar con el mismo reto pero cifrado con la clave secreta compartida.

Las funciones básicas de control de acceso al medio que se acaban de resumir estaban incluidas en la versión de 802.11 publicada en 1999, junto con las opciones de capa física a una velocidad máxima de 2 Mbit/s citadas previamente.

En documentos posteriores del IEEE, aparte de definir nuevas capas físicas de mayor velocidad, se extendieron las funciones de la capa MAC introduciendo, por ejemplo, modificaciones en el algoritmo de control de acceso al medio que permiten tener varias clases de servicio diferenciadas, procedimientos de seguridad más robustos ante ataques y simplificaciones para facilitar la movilidad de terminales de un punto de acceso a otro minimizando la interrupción de la comunicación con la red.

2.6.3.2 IEEE 802.11b

El IEEE 802.11b (1999) define otra capa física en 2,4 GHz que usa espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y permite incrementar la velocidad máxima de transmisión desde los 2 Mbit/s del estándar 802.11 hasta 11 Mbit/s. Inicialmente fue el más utilizado.

2.6.3.3 IEEE 802.11a

El IEEE 802.11a (1999) eleva la velocidad máxima de la capa física a 54 Mbit/s, casi 5 veces superior a la de 802.11b. A diferencia de la anterior, esta capa física usa multiplex por división en frecuencia ortogonal (OFDM) y frecuencias más altas, en la banda de 5 GHz, con espacio para más canales y menos propensa a interferencias que la banda de 2,4 GHz. El uso de frecuencias más altas causa una mayor absorción de las señales por obstáculos, lo que tiende a reducir el alcance de 802.11a comparado con el de 802.11b. Sin embargo, la robustez de OFDM frente a interferencias multitrayecto compensa en parte la desventaja anterior, por lo que en la práctica el alcance de ambos sistemas es similar. A pesar de su mayor velocidad, este estándar ha tenido una implantación más reducida que el 802.11b. Ver datos en el apartado 2.6.4.

2.6.3.4 ETSI HIPERLAN/2

El estándar HIPERLAN/2 (*High Performance Radio Local Area Network type 2*) [88] se desarrolló en el proyecto BRAN (*Broadband Radio Access Network*) [89] iniciado por ETSI en 1997. Existe una versión anterior, HIPERLAN/1, publicada en 1996, que no llegó a utilizarse. A pesar del interés inicial de fabricantes y organismos de normalización europeos y japoneses, el estándar 802.11 del IEEE ha sido el que se ha impuesto en el mercado.

HIPERLAN/2 tiene una capa física muy parecida a IEEE 802.11a, también en la banda de 5 GHz y con la misma velocidad máxima de 54 Mbit/s. Sin embargo, sus procedimientos de control de acceso al medio son muy diferentes. Ver una comparación de ambos estándares en [90]. HIPERLAN/2 centraliza las funciones de control en el punto de acceso y funciona en modo orientado a conexión. El punto de acceso se encarga de asignar intervalos de tiempo para transmitir en el canal radio a los terminales que tienen conexiones activas, teniendo en cuenta sus requisitos de calidad de servicio. (Además del modo de operación centralizado, HIPERLAN/2 define un modo directo para redes ad-hoc).

La asignación de intervalos de transmisión se basa en una trama temporal periódica de duración 2 ms. Dentro de cada periodo de 2 ms se alternan en el tiempo los dos sentidos del tráfico (de los terminales al punto de acceso y viceversa) junto con intervalos dedicados a señalización, por ejemplo peticiones y asignaciones de intervalos de tráfico. Ver detalles de funcionamiento en [91].

Por encima del MAC, HIPERLAN/2 usa un procedimiento de control de errores con tres opciones: acuse de recibo con retransmisión selectiva, retransmisión preventiva o sin retransmisiones. Ver Figura 77. A cada terminal se le asigna el procedimiento más adecuado a sus necesidades de calidad de servicio, por ejemplo retransmisión selectiva para máxima fiabilidad o sin retransmisión para mínimo retardo. Por su parte, el bloque de control de enlace radio se encarga de la gestión de recursos radio (por ejemplo selección dinámica de frecuencias, control de potencia), de la señalización con los terminales que solicitan recursos y de funciones de seguridad (autenticación y cifrado).

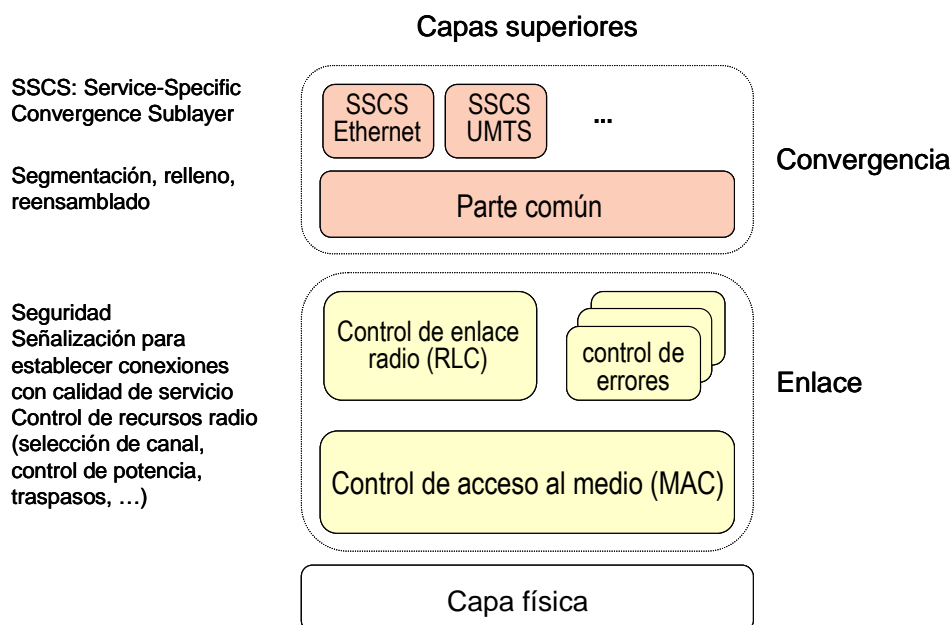


Figura 77. Estructura de protocolos de HIPERLAN/2

La arquitectura de HIPERLAN/2 se completa con una capa de convergencia para facilitar su interconexión con otras redes. Como muestra la Figura 77, esta capa incluye una parte común y bloques específicos de interfaz con diferentes redes externas. La capa de convergencia realiza operaciones de segmentación y relleno adecuadas para los bloques de datos procedentes de las redes externas y genera las unidades de datos de servicio que se pasan a la capa inferior. Finalmente estas unidades de datos se encapsulan y transmiten por el canal radio en los intervalos de tiempo asignados para ello por el punto de acceso.

El proyecto ETSI BRAN trabajó también en otros dos sistemas radio complementarios de HIPERLAN/2, llamados HIPERACCESS e HIPERLINK y pensados para interconectar los puntos de acceso HIPERLAN/2 a la red troncal [88].

2.6.3.5 IEEE 802.11g

El IEEE 802.11g (2003) ofrece la misma velocidad máxima de 54 Mbit/s que 802.11a pero usando la misma banda de 2,4 GHz que 802.11b, con dos opciones: OFDM o DSSS mejorado. Además del incremento de velocidad, esta nueva capa física tiene mayor alcance debido a combinar las ventajas de OFDM en cuanto a robustez frente a interferencia multitrayecto con la menor absorción de la banda de 2,4 GHz.

Una ventaja importante de 802.11g es su compatibilidad con 802.11b. Al desplegar un nuevo punto de acceso 802.11b/g, los antiguos terminales 11b pueden seguirse utilizando junto con los nuevos terminales 11g coexistiendo en los mismos canales. Esto facilita la migración de un estándar a otro y ha favorecido la amplia difusión del 802.11g.

La Tabla 38 resume las características básicas de la capa física en 802.11 y en las tres enmiendas presentadas: 802.11a, 11b y 11g. Las velocidades máximas de transmisión indicadas en la tabla solo se alcanzan cuando el canal radio ofrece buenas condiciones de transmisión y bajas tasas de error. A medida que las condiciones empeoran, la velocidad de transmisión se reduce automáticamente para tratar de maximizar el número de tramas recibidas sin error. Ver apartado 2.6.5.

Tabla 38. Características de transmisión de los estándares 802.11, 11a, 11b y 11g

Estándar	Publicación	Banda	Modulación	Velocidades posibles
802.11	1997	2.4 GHz *	FHSS, DSSS	1, 2 Mbit/s
802.11a	1999	5 GHz	OFDM	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s
802.11b	1999	2.4 GHz	DSSS	1, 2, 5.5, 11 Mbit/s
802.11g	2003	2.4 GHz	DSSS, OFDM	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s

* 802.11 especifica también una implementación en la banda de infrarrojos

FHSS: Frequency-Hopping Spread Spectrum

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

2.6.3.6 IEEE 802.11i

A diferencia de los anteriores, el IEEE 802.11i (2004) no introduce una nueva capa física, sino que especifica procedimientos de seguridad más robustos, con el objetivo de paliar las debilidades detectadas en los mecanismos de seguridad definidos en IEEE 802.11-1999. Este estándar definía un procedimiento para cifrar la información en el interfaz radio llamado WEP (*Wired Equivalent Privacy*). Sin embargo, poco después de su publicación se detectaron vulnerabilidades significativas de WEP [92][93][94] que permitían descifrar la información con relativa facilidad. Los fabricantes empezaron a implementar parches propietarios para contrarrestarlas y el IEEE inició el estudio de esquemas mejorados de autenticación, cifrado e integridad que dio lugar a la publicación de la enmienda 802.11i en 2004. Antes de esa fecha, la Alianza Wi-Fi empezó a certificar equipos que implementaban un subconjunto de los nuevos procedimientos 802.11i asignándoles la identificación WPA (*Wi-Fi Protected Access*). El nombre WPA2 identifica los equipos posteriores que ya implementan todas las mejoras de 802.11i.

En cuanto a la autenticación, tanto WPA como WPA2 ofrecen dos opciones: “personal” y “empresa”. WPA/WPA2 personal está basado en contraseñas, como la autenticación que ya existía en 802.11-1997, lo que se considera suficiente para redes pequeñas (por ejemplo un punto de acceso residencial), donde no es práctico implementar procedimientos más complicados.

WPA/WPA2 empresa adopta para las WLAN el estándar IEEE 802.1X-2001 y protocolos de seguridad del IETF como EAP (*Extensible Authentication Protocol*), lo que permite una variedad de procedimientos de autenticación más robustos y adaptados a las necesidades de redes WLAN grandes [95][96]. Por ejemplo, se pueden usar mecanismos de reto/respuesta similares a los de las redes móviles 2G y 3G, así como mecanismos basados en infraestructura de clave pública, con certificados solo en el lado de red o en ambos, red y terminal. Al certificar un producto, la Alianza Wi-Fi detalla qué opciones de seguridad implementa: WPA o WPA2, personal o empresa, y qué variantes de EAP (EAP-TLS, EAP-TTLS, EAP-SIM, Protected EAP...) [97].

En cuanto a las mejoras en el cifrado y control de integridad de los mensajes enviados, WPA y WPA2 son también similares e introducen un nuevo mecanismo denominado TKIP (*Temporal Key Integrity Protocol*) y claves de cifrado más largas. Como diferencia más destacada, además de TKIP, WPA2 puede usar el estándar de cifrado de alta seguridad AES (*Advanced Encryption Standard*).

2.6.3.7 IEEE 802.11e

El mecanismo de acceso al medio de 802.11-1999 trata todo el tráfico de usuario por igual, ofreciendo una única clase de servicio. Esta solución era suficiente para las aplicaciones que generan tráfico de datos sin requisitos estrictos de retardo, uso típico de las WLAN en sus inicios, pero dificultaba la introducción de nuevas aplicaciones (por ejemplo voz y vídeo) que necesitan un retardo pequeño.

Por ello, IEEE 802.11e (2005) plantea separar el tráfico de cada terminal en varias colas de espera según sus requisitos de retardo, y especifica cambios en las reglas de

acceso al canal radio para dar mayor prioridad de acceso a las colas con tráfico más sensible al retardo. El mecanismo EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) establece cuatro colas de mensajes en cada terminal, que pueden corresponder respectivamente a: voz, vídeo, datos y tráfico de fondo con prioridad mínima.

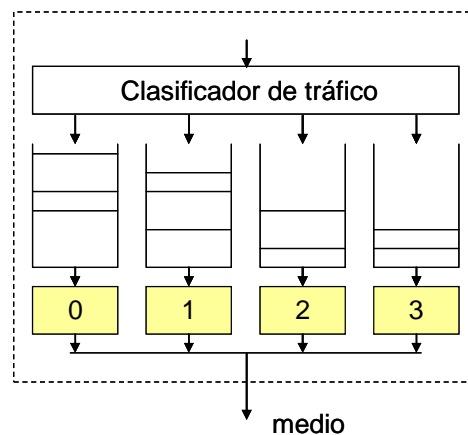


Figura 78. Colas de espera con diferentes prioridades en una estación 802.11e

Cada cola usa las reglas de acceso distribuido por contienda descritas antes, pero con tiempos de espera antes de acceder al canal más cortos cuanto mayor sea la prioridad de la cola [98]. Este procedimiento de diferenciación consigue que la fracción de capacidad ofrecida a los flujos de más prioridad se mantenga estable aunque el canal radio esté cargado, con lo que la calidad del servicio de voz o vídeo que observa el usuario correspondiente no se degrada.

La Figura 79, tomada de [99], muestra un ejemplo. En la parte superior de la figura, donde no se usa 802.11e, el incremento del tráfico de datos que se produce en torno a los 10 segundos debido a la aparición de un segundo flujo de datos satura el canal y reduce la fracción de capacidad que obtiene el flujo de vídeo. En cambio, en la parte de abajo el flujo de vídeo tiene mayor prioridad y obtiene en todo momento una capacidad de 10 Mbit/s. Los dos flujos de datos de menor prioridad se reparten la capacidad restante en el canal.

Además del mecanismo de prioridades descrito, 802.11e define otros procedimientos [100]: un acceso basado en sondeo o HCCA (*Hybrid coordination function Controlled Channel Access*), el envío de varios acuses de recibo en bloque en lugar de uno separado por cada trama recibida y la opción de no enviar acuses de recibo, con lo que se prescinde de los mecanismos de recuperación de errores en la capa MAC.

El programa de certificación de la Alianza Wi-Fi denominado WMM (*Wi-Fi Multimedia*) prueba solo el mecanismo de prioridades EDCA. Por su parte, la certificación *WMM Power Save* prueba otros mecanismos de ahorro de energía incluidos en 802.11e adecuados para terminales que funcionan con baterías, por ejemplo un teléfono móvil Wi-Fi.

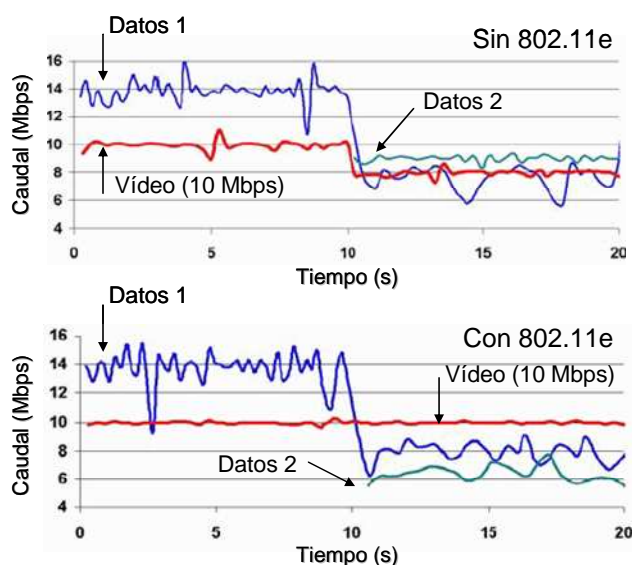


Figura 79. Ejemplo de uso de calidades de servicio diferenciadas con 802.11e

2.6.3.8 IEEE 802.11-2007

En junio de 2007 el IEEE publicó una nueva versión del estándar 802.11 [84] en el que se incorporan las modificaciones aprobadas desde la versión de 1999. Además de las 802.11a, 11b, 11e, 11g y 11i descritas en apartados anteriores, 802.11-2007 incluye las siguientes: **802.11d** (2001) sobre operación de 802.11a/b en diferentes dominios regulatorios, **802.11h** (2003) sobre mecanismos de selección de canal radio y control de potencia, y **802.11j** (2004) sobre operación 4,9 y 5 GHz. El documento **802.11F** sobre prácticas recomendadas en el protocolo IAPP (*Inter Access Point Protocol*) que se había publicado en 2003 fue retirado por el IEEE en febrero de 2006.

Tras la aparición de IEEE 802.11-2007, el IEEE continuó el desarrollo de varias nuevas enmiendas que se resumen a continuación.

2.6.3.9 IEEE 802.11r

El IEEE 802.11r (2008) tiene como objetivo minimizar el tiempo que tarda un terminal móvil en cambiar de un punto de acceso a otro según se desplaza para obtener mejor cobertura.

Tomando como ejemplo el caso de las redes móviles celulares, el estándar GSM (y posteriormente UMTS) se diseñó desde el principio para que fuera capaz de traspasar una comunicación telefónica de una estación base a otra de forma “transparente” para el usuario, es decir sin que se perciba ningún corte en la comunicación. Para ello se utiliza un procedimiento complicado en el que se monitoriza continuamente la señal de la estación base actual y de otras vecinas. Cuando la calidad de la comunicación con la estación base actual queda por debajo de un cierto umbral y antes de que dicha comunicación se corte, se elige un nuevo

canal en otra estación base vecina y se ordena al terminal que ejecute un traspaso de la comunicación, esto es, que abandone el canal actual y se cambie al nuevo. Cuando el traspaso se ha completado, el canal antiguo se libera para su uso por otros terminales. Este esquema se conoce en inglés como *"make before break"*.

En cambio, el diseño inicial de los procedimientos IEEE 802.11 no tuvo en cuenta el requisito de traspaso transparente de la comunicación de un punto de acceso a otro. Si se pierde la comunicación con el punto de acceso actual, el terminal empieza a buscar otro y, si lo encuentra, reanuda la comunicación, es decir, se sigue un esquema *"break before make"*. Para aplicaciones como transferencia de ficheros o acceso a páginas Web, la interrupción que se produce durante el cambio de un punto de acceso a otro según este esquema causa un pequeño retraso en la descarga de la información que puede incluso pasar desapercibido para el usuario que está esperando a que se complete. Sin embargo, si lo que se pretende es mantener una comunicación telefónica sobre la red Wi-Fi con una calidad comparable a la que el usuario está acostumbrado a obtener en las redes móviles, la interrupción temporal de la llamada durante el cambio de un punto de acceso a otro no es aceptable.

Aparte de que, como se acaba de mencionar, el traspaso transparente no estaba considerado en el diseño inicial de 802.11, los procedimientos de seguridad más robustos introducidos posteriormente en la enmienda 802.11i han tenido el efecto secundario indeseado de alargar el tiempo necesario para completar un traspaso. Ahora, antes de poder continuar la comunicación a través de un nuevo punto de acceso es necesario completar procedimientos de autenticación y distribución de nuevas claves de seguridad que son más lentos.

Existen soluciones parciales para acelerar los trasposos que no implican cambios en el estándar y que pueden usar los equipos que estén configurados para ello: iniciar la búsqueda de puntos de acceso alternativos antes de que se degrade demasiado la comunicación con el actual y optimizar dicha búsqueda explorando los canales radio disponibles no en cualquier orden, sino empezando por aquellos donde puede ser más probable encontrar un punto de acceso adecuado, por ejemplo en base al historial de puntos de acceso utilizados recientemente por el terminal.

La propia especificación 802.11i, incluida ahora en 802.11-2007, tiene mecanismos opcionales de almacenamiento temporal de claves (*key caching*) y de preautenticación para acelerar el cambio de punto de acceso. Sin embargo, se trata de opciones no consideradas en la certificación WPA sino solo en WPA2 (ver apartado 2.6.3.6), poco implementadas y, en todo caso, poco eficaces.

La enmienda 802.11r sobre cambio rápido de punto de acceso especifica el cálculo y distribución anticipada de las claves necesarias para comunicarse con otros puntos de acceso adelantándose a un eventual traspaso, lo que evita el retardo necesario para comunicarse con un servidor de autenticación durante el cambio. Además, en el momento de ejecutar el traspaso, se minimiza el número de mensajes que deben intercambiar el terminal y el nuevo punto de acceso antes de completarlo. Para ello, se envían juntos todos los datos necesarios, no solo las claves de seguridad para 802.11i, sino también los parámetros que hacen falta para el control de calidad de servicio cuando se esté utilizando 802.11e.

En estudios de prestaciones publicados en la literatura [101] se estima que el tiempo de cambio de punto de acceso se puede reducir desde valores que oscilan entre 300 y 800 ms sin 802.11r hasta valores en torno a 40 ms aplicando 802.11r.

2.6.3.10 IEEE 802.11k

802.11k (2008) especifica un conjunto de medidas sobre el estado del interfaz radio (potencia, ocupación de canales, número de tramas recibidas, etc.) que pueden utilizar los equipos de red y los terminales Wi-Fi para hacer un uso más eficiente de los recursos radio disponibles. Por ejemplo, esta información facilita que cuando un terminal encuentra que el punto de acceso del que recibe mejor señal soporta mucho tráfico, el terminal pueda seleccionar otro punto de acceso con menor carga. Cuando es necesario cambiar de punto de acceso, 802.11k facilita la selección de un nuevo punto adecuado con lo que ayuda a reducir el tiempo necesario para el cambio, complementando a los procedimientos 802.11r descritos en el apartado anterior.

2.6.3.11 IEEE 802.11n

El objetivo de 802.11n no se limita a aumentar la velocidad máxima de transmisión alcanzable en la capa física, sino que se centra en incrementar significativamente la velocidad útil ofrecida a los protocolos que funcionan por encima de la capa de control de acceso al medio (MAC) y, en última instancia, a las aplicaciones de usuario. Así, la meta propuesta para 802.11n fue superar los 100 Mbit/s de velocidad útil. Para conseguirlo, además de cambios en la capa física, fue necesario introducir mejoras que reducen la sobrecarga causada por los procedimientos MAC [102][103].

Para poner esta cifra en perspectiva, debe tenerse en cuenta que con 802.11a y 802.11g se tiene una velocidad máxima de 54 Mbit/s pero típicamente solo se consiguen unos 25 Mbit/s de caudal o velocidad útil una vez descontadas las sobrecargas (ver apartado 2.6.5). Con 802.11n se pueden alcanzar 600 Mbit/s en la capa física y 400 Mbit/s de velocidad útil en la capa MAC. Esto abre las redes Wi-Fi a aplicaciones que requieren altas capacidades de transmisión, tales como vídeo en alta definición.

Como aspectos más significativos, 802.11n utiliza múltiples antenas en ambos lados del interfaz radio (MIMO) y canales de 20 ó 40 MHz, en las bandas de 2,4 y 5 GHz. Se pueden utilizar desde 1 hasta 4 antenas según el tamaño y coste del equipo de que se trate. En cuanto a la capa MAC, la principal mejora para aumentar su eficiencia y, por consiguiente, la velocidad útil ofrecida a capas superiores, es la agregación o concatenación de varias tramas antes de su transmisión. De esta forma, la sobrecarga no recae sobre cada trama, sino que se reparte entre el conjunto de tramas concatenadas y se consigue que la velocidad útil crezca linealmente con la velocidad de transmisión, como muestra la Figura 80. La gráfica, tomada de [103], representa los valores posibles de velocidad de transmisión y velocidad útil que se pueden obtener según la anchura del canal radio y el número de antenas, utilizando agregación de tramas.

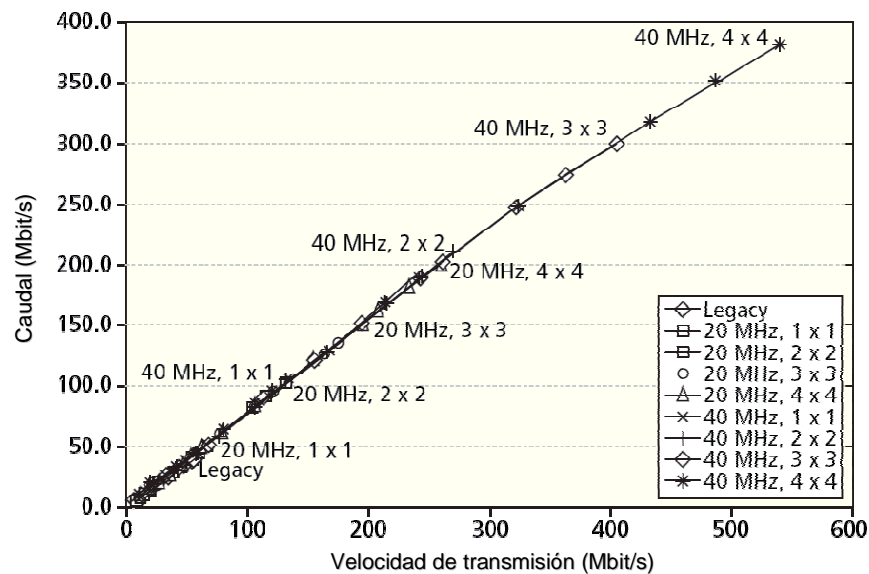


Figura 80. Caudal de 802.11n en función de la velocidad de transmisión

Otra característica de 802.11n es su interoperabilidad con 802.11a y 11g. Para ello, el comienzo de las transmisiones de 802.11n está codificado de forma que sea decodificable por un dispositivo 802.11a/g y que este evite colisionar con las tramas de 802.11n. Se trata del mismo tipo de interoperabilidad que existe entre 802.11g y 802.11b. Además, en el caso de 802.11n hay un procedimiento adicional para permitir la coexistencia de equipos que usan canales de 20 MHz con otros que usan los canales opcionales de 40 MHz.

En ambos casos, los mecanismos de interoperabilidad con los estándares anteriores introducen también una sobrecarga extra. Por ello, son opcionales y se pueden evitar en redes formadas solo por equipos 802.11n que no requieran compatibilidad con equipos preexistentes.

La enmienda 802.11n ha tenido una elaboración bastante lenta desde que empezó en 2003 (año de la publicación de 802.11g). Mientras tanto, aparecieron en el mercado equipos anunciados como “pre-N” aunque sin certificación. En junio de 2007 la Alianza Wi-Fi empezó las pruebas de productos basándose en la versión 2.0 del borrador de 802.11n. Un año después, cuando la especificación definitiva seguía aún sin publicar, aproximadamente el 10% de los equipos certificados implementaban ya el borrador citado.

2.6.3.12 IEEE 802.11s

La enmienda 802.11s, por su parte, especifica procedimientos para redes Wi-Fi malladas en las que la información puede dar más de un salto a través de enlaces radio entre equipos Wi-Fi hasta llegar a su destino. En la configuración típica descrita en el apartado 2.6.2 cada punto de acceso de la red Wi-Fi está cableado, por lo que la información solo cruza el interfaz radio una vez, del terminal al punto de

acceso o viceversa. (Una excepción a esto es el uso de repetidores Wi-Fi que sirven para ampliar la cobertura de un punto de acceso en una zona determinada. En este caso, se establece la comunicación en dos saltos y cada trama se envía dos veces: una entre terminal y repetidor y otra entre repetidor y punto de acceso).

Con 802.11s, los equipos intermedios que establecen enlaces inalámbricos 802.11 entre ellos se denominan MP (*mesh point*). Los MP que permiten el acceso de los terminales se llaman MAP (*mesh access point*) y los MP conectados a redes externas, MPP (*mesh portal*).

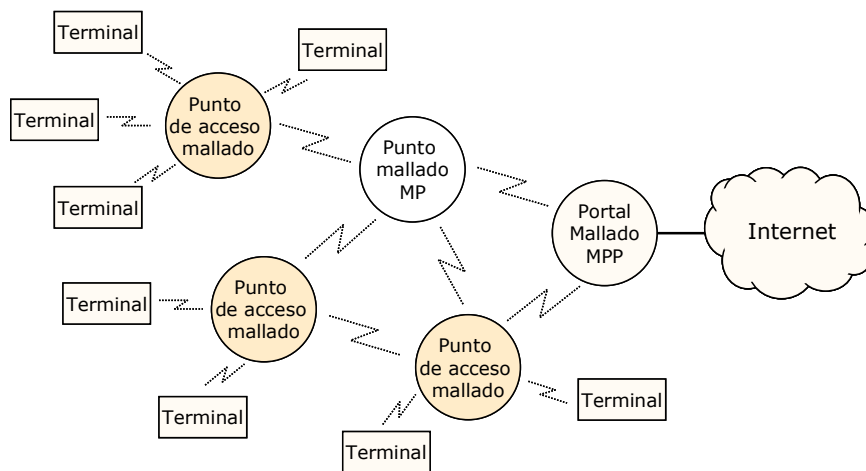


Figura 81. Red Wi-Fi mallada

Habitualmente, entre un terminal y el portal MPP habrá varias rutas posibles, de forma que si un punto intermedio falla, el tráfico se puede desviar por otra ruta. El uso de redes malladas con MPs intermedios que se comunican solo por Wi-Fi y no necesitan estar cableados reduce el coste de desplegar redes Wi-Fi con zonas de cobertura grandes, por ejemplo en el caso de redes municipales. Los detalles de las novedades introducidas en 802.11s en cuanto a descubrimiento de topología de la red, encaminamiento, implicaciones en cuanto a seguridad, etc. de las redes malladas pueden consultarse en [104].

2.6.3.13 Otras especificaciones 802.11

Además de las descritas en los apartados precedentes, otras enmiendas posteriores al estándar 802.11-2007 son [105]:

- **802.11p**: sobre uso de Wi-Fi en vehículos, por ejemplo para aplicaciones de pago de autovías, información sobre tráfico, seguridad vial, etc.
- **802.11u**: cambios en 802.11 para facilitar el interfuncionamiento con redes externas
- **802.11v**: gestión de redes y dispositivos Wi-Fi
- **802.11w**: extensión de 802.11i para proteger las tramas de gestión

- **802.11y**: operación en la banda de 3650-3700 MHz en EE.UU.
- **802.11z**: extensiones del mecanismo DLS (*Direct Link Setup*) de 802.11e
- **802.11aa**: transporte de audio y vídeo en modo *streaming*
- **802.11ac**: caudal muy alto en bandas por debajo de 6 GHz
- **802.11ad**: caudal muy alto en la banda de 60 GHz (57-66 GHz)
- **802.11.2**: a diferencia de las anteriores, este documento no es una enmienda, sino que define una práctica recomendada para la evaluación de prestaciones de 802.11 en diversos escenarios

El IEEE tiene un grupo de trabajo (TGmb) dedicado al mantenimiento del estándar 802.11 y a la consolidación de las nuevas enmiendas [106] [107] aprobadas en una futura versión del mismo, prevista para 2011.

2.6.3.14 Estándares de interconexión WLAN - redes móviles

El *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) ha publicado varias especificaciones sobre esta materia:

- Interfuncionamiento de redes móviles con WLAN (I-WLAN) [108]
- Red de Acceso Genérica (GAN) [109], también conocida como UMA²⁰
- Convergencia basada en el Subsistema IP Multimedia (IMS) con continuidad de llamadas de voz (VCC) [110]

Por su parte, el grupo IEEE 802.21 [111] estudia mecanismos de traspaso de comunicaciones entre redes inalámbricas diferentes (traspasos “verticales”), incluyendo no solo Wi-Fi y redes móviles 3GPP, sino también WiMAX. Ver secciones 2.4 y 2.7.

Otras iniciativas de normalización más generales proceden del comité ETSI TISPAN (*Telecoms & Internet converged Services & Protocols for Advanced Networks*) y de UIT-T, centradas en arquitecturas de red de próxima generación (NGN) que incluyen múltiples tecnologías de acceso fijo y móvil. Ver sección 3.

2.6.4 Madurez de la tecnología y del mercado

La tecnología de redes locales inalámbricas IEEE 802.11 o Wi-Fi puede considerarse madura, al menos en lo que respecta a los estándares básicos de transmisión como 802.11a, 11b y 11g, publicados entre 1999 y 2003, así como a las mejoras de seguridad 802.11i, publicadas en 2004 y más conocidas en el mercado con las siglas WPA (*Wi-Fi Protected Access*) y WPA2. La disponibilidad de equipos es muy amplia, con más de 4000, entre puntos de acceso y terminales de diversos tipos, certificados por la Alianza Wi-Fi entre 2000 y 2008.

²⁰ UMA: abreviatura de *Unlicensed Mobile Access*, que era el nombre original de la propuesta de un grupo de empresas que luego normalizó el 3GPP, o también de *Universal Mobile Access*. Ver <http://www.umatoday.com>

Tabla 39. Programas de certificación de la Alianza Wi-Fi

Programa de certificación	Comienzo	Carácter	Estándar	Detalles
IEEE 802.11b	2000	Obligatorio al menos uno de los tres	802.11b	Interfaz radio
IEEE 802.11g	2001		802.11g	Interfaz radio
IEEE 802.11a	2002		802.11a	Interfaz radio
IEEE 802.11d	2004	Opcional	802.11d	Requisitos de regulación
IEEE 802.11h	2004	Opcional	802.11h	Requisitos de regulación
WPA (personal, empresa)	2001	Obligatorio	Parte de 802.11i	Seguridad (obligatorio desde 2003)
WPA2 (personal, empresa)	2003	Obligatorio	802.11i	Seguridad (obligatorio desde 2006)
EAP	2005	Obligatorio	IETF EAP, versiones propietarias	Seguridad (obligatorio desde 2006)
WMM	2004	Opcional	Parte de 802.11e	Calidad de servicio
WMM Power Save	2005	Opcional	Parte de 802.11e	Ahorro de energía
Converged Wireless Group RF Profile	2006	Opcional	Alianza Wi-Fi y CTIA	Interfaz radio en dispositivos duales Wi-Fi/celulares
Wi-Fi Protected Setup	2007	Opcional	Alianza Wi-Fi	Configuración de parámetros de seguridad
IEEE 802.11n	2007	Opcional	802.11n draft 2.0	Interfaz radio de mayor velocidad
Voz	2008	Opcional	Alianza Wi-Fi	Pérdidas y retardo de paquetes

Las pruebas de certificación Wi-Fi se realizan en laboratorios independientes de varios países, entre ellos el de la empresa *AT4 wireless* situado en España. La Tabla 39 recoge los programas de certificación iniciados por la Alianza Wi-Fi. La mayoría de estos programas corresponden a especificaciones del IEEE, mientras que algunos como *Wi-Fi Protected Setup* o el nuevo programa para aplicaciones de voz prueban especificaciones o requisitos de la propia Alianza Wi-Fi.

La Figura 82 muestra el formato de los certificados que indican qué programas de pruebas ha pasado correctamente un determinado equipo.

Wi-Fi® Interoperability Certificate
Certification ID: WFAxxxx



This certificate indicates the capabilities and features that successfully completed interoperability testing by the Wi-Fi Alliance. You may find detailed descriptions of these features at www.wi-fi.org/certification_programs.php.

Certificate Date: date_of_product_certification
Category: primary_product_category
Company: company_name
Product: product_name
Model/SKU #: model_number/sku

This product has the following Wi-Fi Certifications:

IEEE Standard	Security	Multimedia	Convergence
IEEE 802.11a IEEE 802.11b IEEE 802.11g IEEE 802.11n draft 2.0 IEEE 802.11d IEEE 802.11h	WPA™ - Enterprise, Personal WPA2™ - Enterprise, Personal EAP Type(s) EAP-TLS EAP-TTLS/MSCHAPv2 PEAPv0/EAP-MSCHAPv2 PEAPv1/EAP-GTC EAP-SIM Vendor EAP Type(s) EAP-TLS EAP-TTLS/MSCHAPv2 PEAPv0/EAP-MSCHAPv2 PEAPv1/EAP-GTC EAP-SIM	WMM  WMM Power Save <div style="background-color: #cccccc; padding: 2px;">Special Features</div> Wi-Fi Protected Setup™ PIN PBC NFC	Voice – Personal CWG-RF Profile (contact manufacturer for results)

For more information: www.wi-fi.org/certification_programs.php

Figura 82. Formato de certificado de interoperabilidad Wi-Fi

El diagrama de la Figura 83 indica el número de equipos certificados que implementan cada uno de los tres estándares de transmisión, 802.11a, 11b y 11g, junto con los que ya implementan el borrador 2.0 del nuevo 802.11n. Con estos datos, correspondientes a enero de 2009, se observa que prácticamente todos los equipos implementan 802.11b, mientras que 802.11a, a pesar de haberse publicado a la vez que el anterior, solo está incluido en el 22% de los equipos. De los dos estándares de 54 Mbit/s, 802.11a y 802.11g, ha sido este segundo el que ha tenido más éxito. En poco tiempo y mientras todavía está en fase de borrador, los fabricantes han implementado ya el nuevo 802.11n en el 12% de sus productos.

La mayoría de los equipos incluyen más de un estándar de capa física, con las combinaciones mostradas en la Figura 84. Aproximadamente el 19% de los equipos implementa solo el estándar 11b, que es el que ofrece la menor velocidad (11 Mbit/s como máximo). La combinación 802.11b/g, la más habitual, se encuentra en casi el 80% de los equipos. El 5,5% implementa las cuatro opciones: 802.11a/b/g/n.

La Figura 85 resume los datos de disponibilidad de equipos que tienen la certificación WPA (correspondiente a un subconjunto de los procedimientos de seguridad especificados en IEEE 802.11i) o WPA2 (802.11i completo), ya sea en la versión personal o en la versión empresa comentadas previamente en el apartado 2.6.3.6. El 84% de los equipos incluye al menos las funciones mínimas de la versión personal, mientras que el 43% implementa todas las opciones posibles.

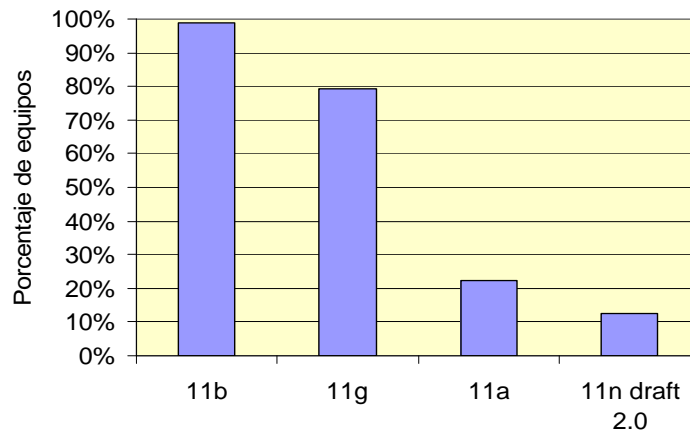


Figura 83. Porcentaje de implementación de estándares de capa física

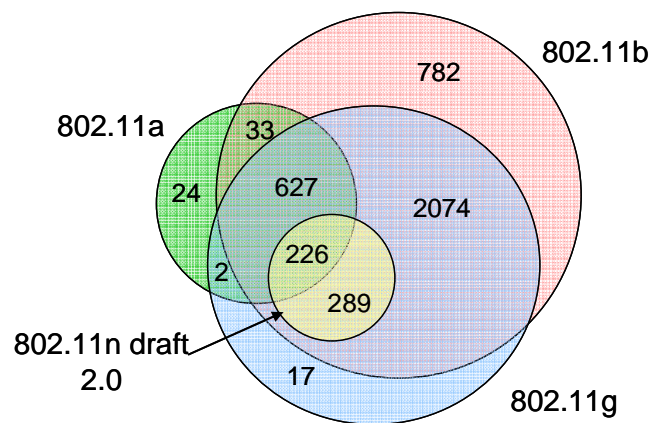


Figura 84. Número de equipos que implementan estándares de capa física

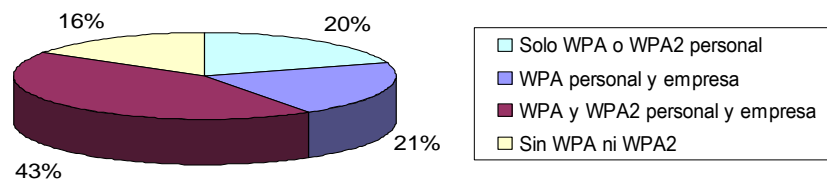


Figura 85. Equipos con certificaciones de seguridad WPA o WPA2

La certificación *Wi-Fi Protected Setup* (ver Tabla 39) indica el cumplimiento de procedimientos definidos por el grupo *Simple Config* de la Alianza Wi-Fi. Su objetivo es facilitar a los usuarios menos expertos la configuración adecuada de parámetros relacionados con los mecanismos de seguridad de WPA/WPA2, tales como identificadores de red y claves. Más de 400 equipos tienen esta certificación opcional, en alguna de sus variantes [112].



Figura 86. Logotipo de los equipos con *Wi-Fi Protected Setup*

Por lo que respecta al soporte de calidad de servicio y procedimientos de ahorro de energía según 802.11e, el porcentaje de equipos que han obtenido las certificaciones correspondientes, WMM (*Wi-Fi Multimedia*) y WMM *Power Save*, se indica en la Figura 87. Aunque la proporción de equipos que implementan WMM es relativamente pequeña, menos de un tercio del total, en números absolutos corresponde a más de 1000 equipos.

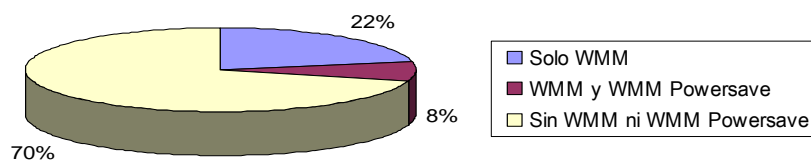


Figura 87. Equipos con certificaciones multimedia WMM y WMM *Power Save*

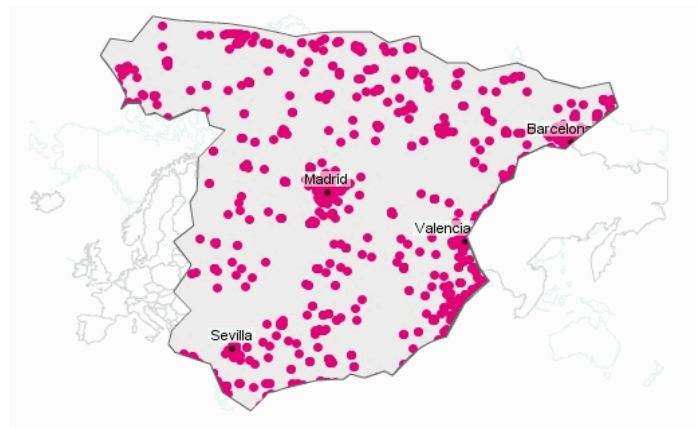
Por último, el programa de certificación para aplicaciones de voz sobre Wi-Fi verifica si un equipo cumple requisitos de prestaciones adecuados para la voz [113]. Este programa se aplica a los equipos que han pasado previamente las pruebas de WPA2, WMM y WMM *Power Save* (esta última es obligatoria en el caso de puntos de acceso y opcional para los terminales).

Además de los estándares ratificados por el IEEE y respaldados por los programas de certificación de la Alianza Wi-Fi, muchos fabricantes buscan diferenciarse de la competencia incluyendo en sus equipos soluciones propietarias para cuestiones que están pendientes de normalización. Por ejemplo, antes de la publicación de la enmienda de seguridad 802.11i y la generalización de las certificaciones correspondientes WPA/WPA2, los fabricantes implementaron diversas funciones propietarias que buscaban resolver los problemas de seguridad detectados en la 802.11 original. Igualmente, antes de la enmienda 802.11e sobre calidad de servicio, varios fabricantes adoptaron el mecanismo propietario denominado *Spectralink Voice Priority* (SVP).

Otro ejemplo más reciente son los procedimientos propietarios de movilidad entre puntos de acceso anteriores a la aprobación de 802.11r, así como los protocolos de gestión de múltiples puntos de acceso en redes grandes que ofrecen diversos fabricantes. Estas mejoras se aplican típicamente en arquitecturas de red inalámbrica con puntos de acceso delgados dependientes de un controlador central (ver Figura 73), de cuya normalización se encarga el grupo IETF capwap (*Control And Provisioning of Wireless Access Points*) [114].

El número estimado de usuarios de Wi-Fi está en torno a los 500 millones según [113]. Wi-Fi se utiliza en hogares, en redes privadas de empresas, universidades, etc. y como red de acceso público en hoteles, aeropuertos, palacios de congresos, etc. En este último caso, el acceso es gratuito en muchas ocasiones, por ejemplo una cafetería o un hotel que ofrecen Wi-Fi gratis como un valor añadido a sus clientes. En otras, es de pago, por ejemplo un aeropuerto donde una empresa instala una red de puntos de acceso y cobra a los viajeros que quieren utilizarla.

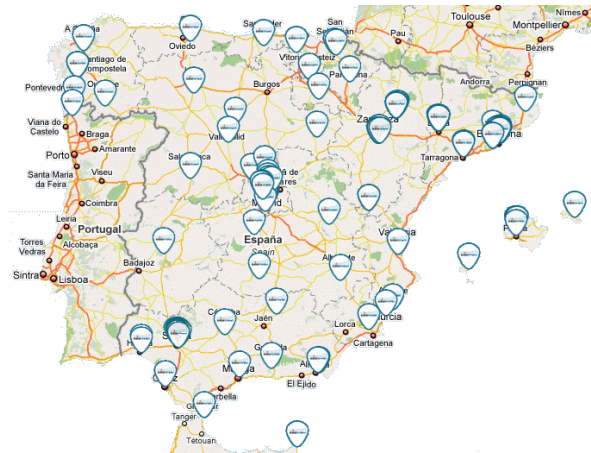
Un mismo operador puede dar servicio Wi-Fi en varios lugares, bien directamente o mediante acuerdos de itinerancia (*roaming*) con otros operadores. Por ejemplo, la empresa T-Mobile ofrece a sus clientes acceso Wi-Fi en más de 20.000 *hotspots* propios y en otros 30.000 a través de acuerdos con otros operadores, repartidos en unos 20 países. La Figura 88 muestra las zonas donde se encuentran los aproximadamente 2000 puntos de esta red disponibles en España.



Fuente: <http://t-mobile.hotspot-directory.co.uk>

Figura 88. *Hotspots* T-Mobile en España

Los acuerdos de itinerancia también pueden establecerse entre redes Wi-Fi privadas. Un buen ejemplo es la iniciativa europea eduroam [115], que ofrece a la comunidad educativa y de investigación acceso Wi-Fi en cualquiera de los centros miembros, utilizando la misma identificación de usuario y contraseña en todos ellos. Esta iniciativa tiene más de 30 países asociados. En España hay más de 60 centros en los que se puede utilizar. Ver Figura 89.



Fuente: www.eduroam.es

Figura 89. Mapa de centros eduroam en España

Volviendo al ámbito de los servicios comerciales, como Wi-Fi funciona en bandas de frecuencia comunes que no requieren disponer de una licencia de uso exclusivo, muchos operadores ofrecen acceso con esta tecnología, disponible en más o menos puntos geográficos dependiendo del tamaño de la red propia y de los citados acuerdos de itinerancia con otras redes. No obstante, se trata de una oferta fragmentada en la que ningún operador es capaz de dar cobertura continua a sus usuarios en una zona geográfica extensa como, por ejemplo, sí consiguen las redes móviles celulares (GSM, UMTS,...). Esto se debe al reducido alcance de los puntos de acceso Wi-Fi (ver apartado 2.6.8).

El despliegue de redes Wi-Fi extensas puede impulsarse por iniciativa pública, por ejemplo de un ayuntamiento para dar servicio a sus ciudadanos con una red Wi-Fi que cubra el término municipal. Sin embargo el uso de fondos públicos para este fin plantea problemas de competencia con los operadores privados. En España, la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) supervisa las condiciones en que puede instalarse o no una red Wi-Fi pública en función de su cobertura, condiciones de financiación, carácter gratuito o de pago para los usuarios, etc. En general, los ayuntamientos u otras entidades que quieran dar servicio en espacios abiertos deben registrarse como operadores y financiar sus redes en condiciones que no supongan competencia desleal con otros operadores.

Una propuesta novedosa para extender la cobertura de una red Wi-Fi consiste en utilizar la capacidad sobrante en los puntos de acceso residenciales para ofrecer acceso público a otros usuarios que se encuentren en las proximidades. Para ello se utilizan equipos de acceso que permiten manejar dos identificadores de red inalámbrica diferentes (dos "WLAN virtuales"), uno para el acceso privado y otro para el acceso público. Los usuarios que forman parte de la red abriendo su Wi-Fi al público pueden recibir un pago por parte del operador y/o usar gratis los accesos de otros miembros. Los usuarios ajenos acceden a la red pagando una cuota. Un ejemplo comercial de este tipo de acceso es FON [116]. En [117] pueden encontrarse detalles técnicos sobre redes que mezclan acceso privado y público.

Ante la dificultad económica de desplegar redes de acceso extensas basadas solo en Wi-Fi (que, al fin y al cabo, es una tecnología de red local), una solución es el interfuncionamiento con el acceso vía redes móviles celulares. En particular, las redes móviles celulares de tercera generación, respaldadas por grandes operadores, están evolucionando rápidamente e implementando nuevas versiones de sus estándares que permiten ofrecer servicios de banda ancha, como es el caso del acceso en modo paquete de alta velocidad (HSPA) en las redes UMTS (ver sección 2.7). En lugar de competidoras, Wi-Fi y UMTS/HSPA pueden verse como tecnologías complementarias, utilizando arquitecturas de interconexión como las citadas en el apartado 2.6.2. Así, un mismo operador puede ofrecer a sus clientes ambos tipos de acceso de forma conjunta, por ejemplo con una factura única. Mediante terminales duales, disponibles ya en el mercado, los usuarios suscritos a este servicio pueden acceder por Wi-Fi cuando llegan a zonas donde hay cobertura de algún punto de acceso y por UMTS/HSPA cuando salen fuera de ellas.

Otro caso donde se combinan el acceso por Wi-Fi y el acceso a través de redes móviles GSM o UMTS es el de las ofertas comerciales de convergencia fijo-móvil (FMC) dirigidas a usuarios que disponen de una conexión fija de banda ancha a Internet, por ejemplo en su casa. Para ello, se añade un punto Wi-Fi a la conexión a Internet y el usuario se equipa con un terminal dual. Cuando se encuentra fuera de casa, el usuario accede a través de estaciones base de red móvil pagando según su tarifa normal. Cuando está en casa, puede usar el mismo terminal para acceder a su red móvil a través del interfaz Wi-Fi y de su conexión a Internet, en lugar de la estación base correspondiente, disfrutando de una tarifa menor. De esta manera el usuario puede seguir utilizando su terminal móvil (con su agenda de contactos, servicios, etc.) dentro de casa, evitando cambiar al fijo por razones de coste.

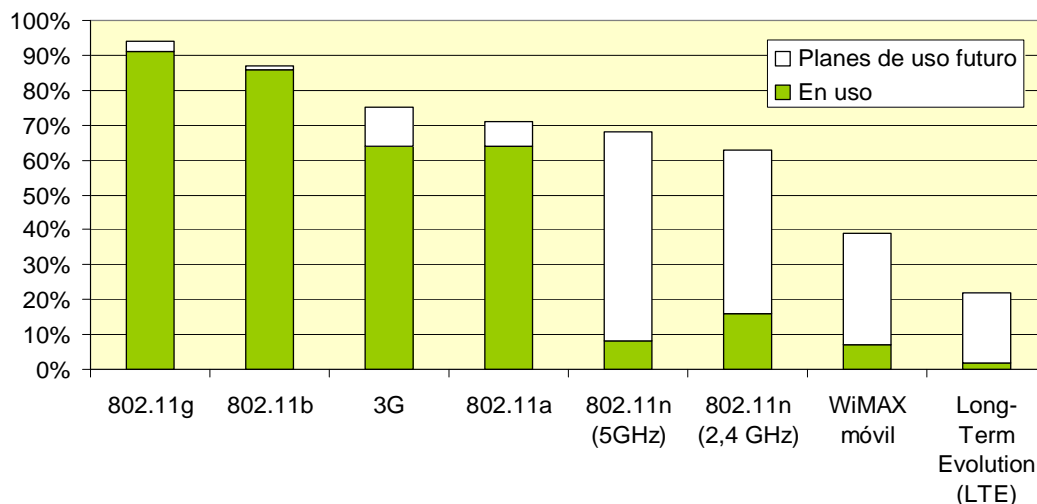
Para el operador, ofrecer acceso a su red móvil también mediante Wi-Fi y red fija permite dar servicio a clientes en zonas donde la cobertura con estaciones base externas puede ser más difícil o, incluso, no estar disponible, y, en todo caso, reducir el volumen de tráfico que cursa por sus estaciones base y su red privada de acceso.

Se han normalizado varias soluciones tecnológicas distintas para integrar el acceso a través de Wi-Fi/red fija con el acceso normal a través de estaciones base de la red móvil. Los estándares más recientes como UMA y VCC (ver apartado 2.6.3.14) permiten incluso cambiar transparentemente de una red de acceso a la otra en el curso de una llamada sin que el usuario lo note, por ejemplo cuando este llega a casa o sale de ella. La Alianza para la Convergencia Fijo-Móvil (FMCA) es un grupo de operadores creado en 2004 que promueve el uso de estos estándares. En el congreso mundial 3GSM celebrado en Barcelona en 2006 se presentaron equipos que implementan UMA y varios operadores han ofrecido servicios comerciales, por ejemplo Orange [118].

Las previsiones actuales indican un crecimiento continuado del mercado de WLAN en los próximos años. Según estimaciones de InStat y ABI Research citadas por el IEEE y la Alianza Wi-Fi, en 2011 usarán Wi-Fi más del 75% de las redes residenciales. En ese año, la producción anual rondaría los 1000 millones de *chipsets* Wi-Fi, triplicando el valor actual, y más de 300 millones de teléfonos móviles

incluirían Wi-Fi, multiplicando por 10 el valor actual. El crecimiento estimado del número de *hotspots* es de un 20% entre 2008 y 2011.

La Figura 90 muestra los resultados de una encuesta a empresas [119] sobre el uso actual y futuro de redes de acceso inalámbrico, incluyendo no solo 802.11 en sus diferentes versiones, sino también las redes basadas en los estándares de WiMAX Móvil, ver sección 2.4, las redes móviles de tercera generación actuales y las mejoras previstas en LTE (*Long-Term Evolution*), ver sección 2.7.



Fuente: www.webtorials.com

Figura 90. Uso de tecnologías de acceso inalámbrico en empresas

2.6.5 Prestaciones

Las prestaciones de una red Wi-Fi dependen de múltiples factores [120]. El estándar de capa física utilizado determina en primer lugar la velocidad máxima de transmisión alcanzable en condiciones óptimas de propagación sobre el canal radio utilizado. Por ejemplo, 802.11g ofrece un máximo de 54 Mbit/s mientras que 802.11b ofrece solo 11 Mbit/s. A medida que las condiciones del canal radio empeoran (debido a una mayor distancia entre punto de acceso y terminal, presencia de obstáculos, interferencias, etc.) y los errores de transmisión aumentan, la capa física reduce progresivamente su velocidad de transmisión para tratar de maximizar el número de paquetes transferidos sin error. Así, en 802.11b la velocidad puede bajar de 11 Mbit/s a 5.5 Mbit/s, 2 Mbit/s ó 1 Mbit/s. En 802.11g las velocidades posibles son 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6 Mbit/s.

Estas cifras se refieren a velocidades de transmisión brutas. A continuación se debe tener en cuenta la sobrecarga introducida por la capa física y la de control de acceso al medio (MAC), que reduce la velocidad neta o caudal útil que queda disponible para las capas superiores. En general, la relación entre caudal útil y velocidad de transmisión puede expresarse mediante un factor de sobrecarga mayor que la unidad:

Caudal útil = Velocidad de transmisión / factor de sobrecarga

o bien mediante un factor de eficiencia, inverso del anterior:

Caudal útil = Velocidad de transmisión . factor de eficiencia

En 802.11 la sobrecarga se debe no sólo a los preámbulos y cabeceras de protocolo que se añaden a cada paquete de información a transmitir, sino también a los tiempos de espera que imponen los procedimientos de control de acceso al medio [87][102]: espera inicial para verificar si el canal está libre antes de transmitir un paquete, tiempo necesario para transmitir un acuse de recibo de cada paquete correctamente recibido, tiempo empleado en retransmisiones en caso de colisión y tiempo necesario para procedimientos de compatibilidad entre diferentes estándares de capa física que comparten el mismo canal (por ejemplo 802.11b y 11g).

Tanto los estudios que modelan analíticamente las prestaciones de los mecanismos definidos en 802.11 como los que se basan en medidas de campo, revelan que las sobrecargas son muy elevadas. Por ejemplo, con 802.11g transmitiendo a su velocidad máxima de 54 Mbit/s, el caudal útil que se obtiene por encima de la capa MAC está típicamente en torno a 25 Mbit/s [103], es decir menos de la mitad.

La cifra anterior es solo indicativa, ya que el caudal útil depende fuertemente del tamaño de los paquetes generados por las aplicaciones. El caudal útil (C) disponible por encima de la capa MAC puede expresarse de forma simplificada como

$$C = V \cdot \text{factor de eficiencia} = V \cdot U / (U + H + T \cdot V)$$

Siendo

- U: bits útiles contenidos en la trama (tamaño del paquete o unidad de datos entregado a la capa MAC para su transmisión)
- V: velocidad de transmisión de los bits útiles
- H: bits de cabeceras, añadidas a la trama por las capas física y MAC, que se transmiten a velocidad V
- T: tiempo adicional necesario para transmitir la trama y el acuse de recibo correspondiente, incluyendo preámbulos y partes de la trama de duración fija independiente de V, así como tiempos de espera para acceso al medio

La expresión anterior da el caudal teórico que se puede alcanzar sin tener en cuenta el tiempo adicional necesario para retransmisiones en caso de errores o colisiones.

Se observa que cuanto menor es el tamaño del paquete, U, menor es la eficiencia y, por tanto, el caudal útil alcanzable para una velocidad de transmisión dada V. Por ejemplo, la eficiencia del transporte de voz sobre 802.11 es mucho más baja que la del transporte de datos, porque los paquetes de voz son más pequeños [121].

Por otra parte, en la expresión anterior se observa que la eficiencia se reduce al aumentar la velocidad de transmisión V, debido a los tiempos fijos englobados en el parámetro T que vienen impuestos por el propio funcionamiento de 802.11. Por ello, el caudal útil C no crece en la misma proporción que la velocidad de transmisión V.

Para valores de V muy grandes, C tendería a un límite máximo $C=U/T$, función de la carga útil U y del tiempo T que viene dado por el estándar.

Por tanto, el caudal se puede aumentar optimizando los procedimientos de acceso, para reducir los tiempos de espera, y transmitiendo varias tramas concatenadas, para aumentar el número de bits útiles, tal como hace el estándar 802.11n. Ver apartado 2.6.3.11 y [103].

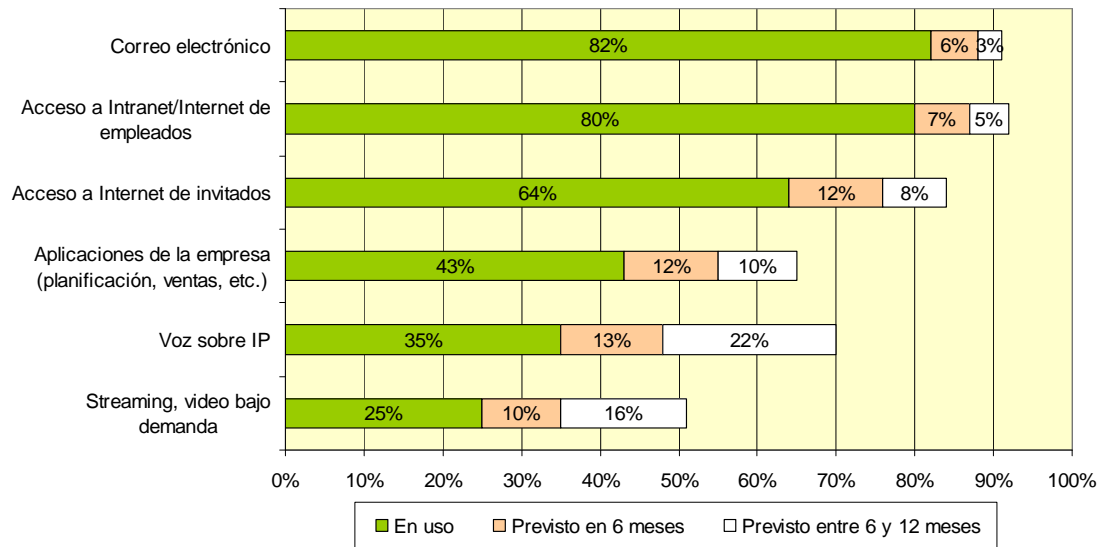
Los párrafos anteriores se refieren al caudal útil disponible en el interfaz de servicio de la capa MAC. Lógicamente, las prestaciones que puede observar un usuario a nivel de aplicación serán menores debido a la sobrecarga adicional que introducen los protocolos de las capas intermedias: IP, TCP, etc.

Asimismo, cuando varios usuarios comparten el mismo canal radio, la capacidad total se reparte entre ellos y el caudal que obtiene cada uno se reduce. La fracción de capacidad que recibe cada uno dependerá del tipo de aplicación que esté utilizando y del uso de mecanismos de calidad de servicio 802.11e (ver apartado 2.6.3.7). También es necesario tener en cuenta que los terminales que estén en zonas con menor nivel de señal, por ejemplo por estar más alejados del punto de acceso o por la presencia de obstáculos, tenderán a transmitir a velocidades menores que la máxima, con lo cual la capacidad total a repartir será menor que si los mismos terminales estuvieran todos en una zona de buena cobertura.

En resumen, las prestaciones que ofrece Wi-Fi pueden ser muy variables dependiendo de la red o caso concreto que se considere. Para las aplicaciones más sensibles a la calidad de servicio será necesario planificar cuidadosamente la red en cuanto al número y localización de los puntos de acceso, configuración de prioridades según 802.11e, etc. El documento IEEE 802.11.2 define métricas de prestaciones para Wi-Fi tales como caudales, retardos y pérdida de paquetes, variación del retardo, tiempos de cambio de punto de acceso, etc., junto con condiciones y procedimientos de medida recomendados para evaluar las prestaciones de las redes Wi-Fi instaladas.

2.6.6 Adecuación a los servicios considerados

En su origen las WLAN estaban orientadas fundamentalmente a servicios de datos sin requisitos estrictos de calidad de servicio, tales como transferencia de ficheros, navegación por la Web o correo electrónico, que siguen siendo mayoritarias. Ver por ejemplo la Figura 91 [122]. Sin embargo, en pocos años los estándares IEEE 802.11 y los equipos disponibles en el mercado han evolucionado notablemente incorporando, entre otras mejoras, mayores velocidades de transmisión, mecanismos de calidad de servicio y traspaso rápido entre puntos de acceso, así como procedimientos de seguridad más robustos, según se ha descrito en los apartados precedentes. Estas mejoras facilitan el despliegue de redes Wi-Fi aptas para servicios más exigentes, tanto para usuarios profesionales como residenciales, por ejemplo: telefonía, videoconferencia, juegos interactivos y televisión (todos ellos sobre IP).



Fuente: www.webtorials.com

Figura 91. Aplicaciones utilizadas sobre redes Wi-Fi empresariales

La Tabla 40 resume consideraciones generales sobre el acceso a diferentes servicios mediante redes Wi-Fi.

Tabla 40. Adecuación de las WLAN para diferentes servicios

Servicio	Soporte en WLAN
Telefonía	Adecuado si se implementan los mecanismos de calidad de servicio que dan prioridad a la voz y, en redes con varios puntos de acceso, los mecanismos de traspaso rápido de llamadas. No obstante, la eficiencia será baja debido a la elevada sobrecarga de las capas física y de acceso al medio en comparación con el pequeño tamaño de los paquetes de voz.
Streaming	Adecuado para <i>streaming</i> de audio y, en el caso de vídeo, para flujos de velocidad moderada, por ejemplo para mostrar vídeo en terminales móviles con pantalla pequeña.
Descarga entre pares (<i>Peer to peer</i>)	Adecuado para esta y otras aplicaciones de transferencia de archivos sin requisitos de retardo.
Juegos en red	Adecuado. Según los casos puede ser necesario asignar un nivel de prioridad más alto a los juegos de alta interactividad.
Distribución de TV	Adecuado si se usan las capas físicas de mayor velocidad y suponiendo que no se necesita transportar más de 1 ó 2 programas simultáneamente.
Vídeo bajo demanda	Adecuado con las mismas consideraciones que el servicio de TV.

La Alianza Wi-Fi establece los siguientes requisitos mínimos de prestaciones para telefonía [113]:

- Pérdida de paquetes < 1%, sin ráfagas de paquetes perdidos
- Retardo < 50 ms
- Variación máxima de retardo < 50 ms

Los valores aceptables para el retardo de traspaso de una llamada en curso de un punto de acceso a otro están por debajo de 50 ms, y pueden obtenerse utilizando 802.11r.

Para el vídeo, IEEE 802.11.2 recomienda medidas de prestaciones objetivas tales como el número de tramas de vídeo perdidas, duplicadas o desordenadas por unidad de tiempo, así como valorar la opinión subjetiva de los usuarios sobre la calidad del vídeo, aunque no establece requisitos mínimos.

Las aplicaciones de vídeo son un mercado de gran interés para Wi-Fi. En particular en el entorno residencial existen multitud de dispositivos (ordenadores, pantallas de TV, reproductores de DVD, cámaras de vídeo, etc.) para los que la interconexión sin cables es una posibilidad muy atractiva para los usuarios. Sin embargo el soporte de vídeo sobre Wi-Fi plantea problemas de capacidad y prestaciones, sobre todo si debe utilizarse concurrentemente con otras aplicaciones exigentes (juegos, voz sobre IP, etc.) y en presencia de interferencias de redes vecinas [123].

Para facilitar el transporte de vídeo sobre Wi-Fi se pueden utilizar mecanismos generales como una capa física de mayor velocidad (802.11n), calidad de servicio (802.11e) y gestión de recursos radio (802.11k). No obstante, el IEEE plantea mejoras específicas para el transporte robusto de audio y vídeo sobre Wi-Fi en la enmienda 802.11aa.

2.6.7 Aspectos regulatorios

Normalmente las redes locales inalámbricas utilizan bandas de frecuencia sin licencia en torno a 2,4 GHz y 5 GHz, aunque la regulación y los detalles de las frecuencias utilizables son diferentes según los países. Algunos estándares del IEEE como 802.11d, 802.11h, 802.11j y 802.11y especifican aspectos particulares de la operación de redes Wi-Fi en Europa, Japón, EE.UU. y otros dominios regulatorios.

En España, el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [36] permite el uso común de WLAN en la banda de 2400 a 2483,5 MHz (nota UN-85) así como en las bandas de 5150 a 5350 MHz y de 5470 a 5725 MHz (nota UN-128), sujeto a restricciones sobre potencia radiada, uso en interiores o en exteriores y cumplimiento de estándares europeos relevantes publicados por ETSI. El uso común no garantiza la protección frente a otros servicios legalmente autorizados ni debe causar perturbaciones a los mismos.

En la banda de 2,4 GHz, utilizada por 802.11b y 802.11g, se dispone de 13 canales solapados de anchura 22 MHz, con frecuencias centrales $f_i = 2407 + i \cdot 5$ MHz, con $i: 1..13$. (De los 13 canales, el 1, el 6 y el 11 no se solapan entre sí).

En la banda de 5 GHz, utilizada por 802.11a, se dispone de dos grupos de 8 y 11 canales respectivamente, con anchura 18 MHz y no solapados. Sus frecuencias

centrales son: $f_i = 5160 + i \cdot 20$ MHz, con $i: 1..8$ para el primer grupo y $f_i = 5480 + i \cdot 20$ MHz, con $i: 1..11$ para el segundo.

Aunque las frecuencias utilizadas por las WLAN no requieren licencia de uso, hay que tener en cuenta las limitaciones que se derivan de la regulación general sobre prestación de servicios de telecomunicaciones en un marco de libre competencia entre operadores, por ejemplo en el caso de redes Wi-Fi municipales (ver sección 2.6.4).

2.6.8 Escalabilidad

En general, las redes de acceso Wi-Fi cubren solo zonas determinadas de pequeña extensión, tales como casas, edificios, zonas comerciales y de negocios. Los intentos de desplegar redes Wi-Fi con cobertura continua en zonas geográficas extensas, por ejemplo una ciudad, han encontrado bastantes dificultades. El alcance de los puntos de acceso está limitado por la presencia de obstáculos, interferencias, etc. que afectan a la propagación de la señal radio. Así, los valores típicos para puntos de acceso 802.11a, 11b y 11g están en torno a los 30-35 m en interiores y 100-110 m en exteriores. Con 802.11n se pueden alcanzar distancias típicas algo mayores, en torno a 70 m y 160 m respectivamente [124]. Las cifras anteriores se refieren a distancias entre el punto de acceso y los terminales situados en sus proximidades en una red de acceso WLAN. Aquí no se consideran otros usos de la tecnología Wi-Fi, en particular su adaptación para conseguir enlaces radio punto a punto a distancias mucho mayores (*long-distance Wi-Fi*), del orden de decenas de kilómetros [125].

Dado el reducido alcance de Wi-Fi, para cubrir adecuadamente una zona extensa se necesita instalar un número elevado de puntos de acceso, lo que representa un coste importante, no tanto por el precio de los propios equipos, sino sobre todo por el coste de interconectar cada uno de ellos con la red y su mantenimiento. Aunque es necesario estudiar cada caso en detalle para precisar las características del despliegue necesario y su coste, como ejemplo ilustrativo para cubrir un círculo de 1 km de radio, que podría corresponder a una población de tamaño mediano, y suponiendo que cada punto de acceso cubre un radio medio de 50 m, haría falta instalar e interconectar del orden de 400 puntos de acceso distribuidos por la zona de cobertura.

En cuanto al crecimiento en velocidad de las redes Wi-Fi, las sucesivas enmiendas al estándar original, desde 802.11a hasta 802.11n, han ido incrementando progresivamente la velocidad disponible: ver Figura 69 y Figura 80. Además de esto, en julio de 2008 se propuso la creación de un nuevo grupo de trabajo dentro de 802.11, ver 802.11ac en [106] [107], cuyo objetivo sería modificar las capas física y de control de acceso al medio actuales para alcanzar caudales de al menos 1 Gbit/s, funcionando en frecuencias inferiores a 6 GHz y manteniendo la compatibilidad con equipos 802.11a y 802.11n en la banda de 5 GHz. De esta manera las WLAN seguirían un camino similar al de las redes locales Ethernet, que incrementaron su velocidad progresivamente desde 10 Mbit/s hasta 100 Mbit/s, 1 Gbit/s y 10 Gbit/s.

2.6.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Como otros sistemas radio, las WLAN están sometidas a las limitaciones de emisión de potencia vigentes en cada país. En España, el Real Decreto 1066/2001 [38] aprobó el reglamento que establece las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas, con los límites citados en la sección 2.4.9.1.

A pesar de estos límites, hay una notable preocupación social sobre posibles efectos negativos para la salud causados por las emisiones radio de las nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica. Hasta el momento esta preocupación se ha centrado más en las redes móviles como GSM, impidiendo o dificultando en muchos casos la instalación de estaciones base. Sin embargo, con la proliferación de las WLAN comienzan a aparecer también voces en contra de su uso, por ejemplo en escuelas, bibliotecas e incluso universidades, alegando que no está demostrada la ausencia de riesgos a largo plazo para la salud.

El uso más habitual de las WLAN es en espacios cerrados, con lo cual su funcionamiento es independiente de las condiciones meteorológicas. En espacios abiertos, las WLAN, al igual que otros sistemas de alta frecuencia, están sometidas a atenuación por gases atmosféricos, lluvia y otros. Entre 2 y 5 GHz esta atenuación es relativamente pequeña, pero crece a frecuencias mayores (por ejemplo decenas de GHz). En caso de querer dar cobertura en una zona geográfica extensa, hay que tener en cuenta el reducido alcance de las WLAN, mencionado en apartados anteriores, que haría necesario instalar un número elevado de puntos de acceso

2.7 Comunicaciones móviles de banda ancha (UMTS/HSPA/LTE)

2.7.1 Motivación original y evolución

Los sistemas de comunicaciones móviles celulares se caracterizan por ofrecer servicio sobre áreas geográficas extensas divididas en zonas de cobertura denominadas células, cada una ellas atendida por una estación base radio. Desde la introducción del concepto de cobertura celular por los Laboratorios Bell a mediados del siglo XX [126] hasta la actualidad, estos sistemas han experimentado una gran evolución.

Centrándonos en su aplicación a redes públicas, la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celulares viene marcada por una serie de etapas denominadas generaciones. La transición entre generaciones supone un salto significativo tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, tal como se ilustra en la Figura 46. Así, junto con el soporte de nuevos servicios, cada nueva generación va acompañada de mejoras de prestaciones y de capacidad.

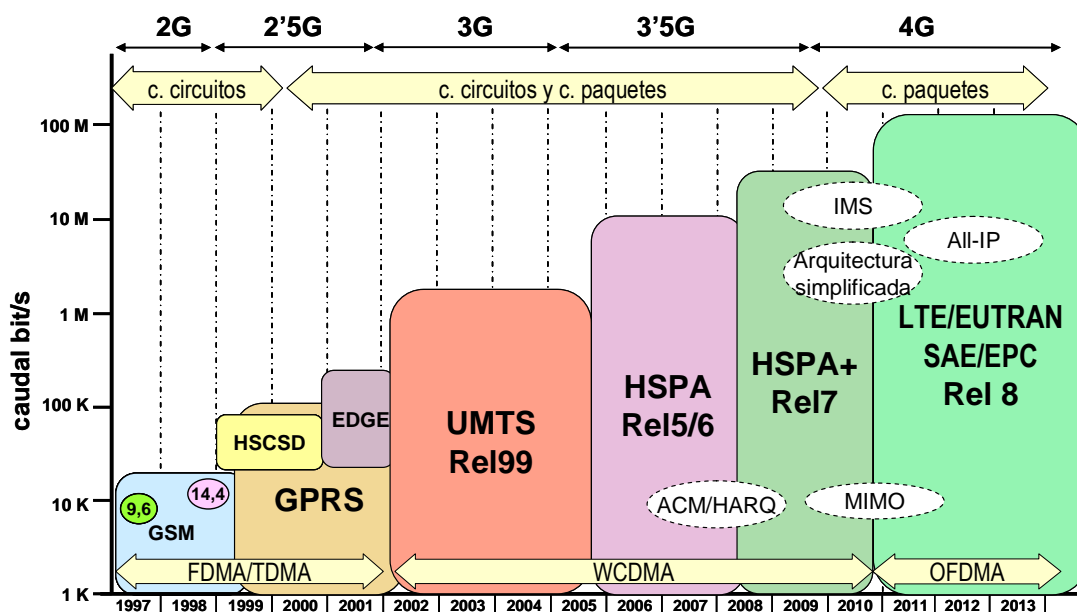


Figura 92. Evolución de sistemas móviles celulares

A continuación se describen las características básicas de tres generaciones de sistemas móviles consideradas hasta la fecha.

- Sistemas de primera generación (generación analógica): Desarrollados a finales de los años 70, básicamente el único servicio que ofrecen es la

telefonía. Entre estos sistemas destacan: NMT (*Nordic Mobile Telephony*), AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), y TACS (*Total Access Communication System*), que es una adaptación europea del sistema AMPS realizada por la Administración del Reino Unido.

- Sistemas de segunda generación (generación digital): Surgidos a principios de los años 90, se caracterizan por el empleo de transmisión digital en la interfaz radio. Proporcionan mejoras de calidad y seguridad, así como una mayor capacidad. Además de telefonía, ofrecen otros servicios como, por ejemplo, mensajes cortos y datos en modo circuito. Entre los principales sistemas 2G cabe destacar D-AMPS (AMPS digital, sucesor de AMPS), cdmaOne (también conocido como IS-95), el sistema PDC (*Personal Digital Cellular*), propietario de NTT DoCoMo, y de manera especial, GSM [127] (*Global System for Mobile Communications*).

A pesar del gran éxito de los sistemas 2G, presentan ciertas limitaciones, especialmente en lo relativo a servicios de datos. Así, por ejemplo, los servicios de datos modo circuito de GSM ofrecen un caudal máximo de solo 9600 bit/s. Con objeto de proporcionar caudales mayores, se definieron varias extensiones a los sistemas 2G, dando lugar a lo que se conoce como sistemas 2'5G. En el caso de GSM, dichas extensiones son HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*), GPRS [128] (*General Packet Radio Service*) y EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*).

- Sistemas de tercera generación (multimedia): A finales de los 90, las prestaciones de los sistemas 2G y de sus extensiones se comenzaron a quedar cortas ante la creciente demanda de mayores caudales para el acceso a Internet y el soporte de servicios avanzados, especialmente los multimedia. La respuesta fue el desarrollo de los sistemas de tercera generación (3G) UMTS [129] (*Universal Mobile Telecommunications System*) y CDMA2000 [130].

La implantación de los sistemas de comunicaciones móviles 3G ha supuesto un hito en términos de mejora de capacidades y prestaciones frente a sus antecesores. Dentro del ámbito geográfico que nos ocupa, el sistema 3G desplegado en Europa es UMTS, concebido a nivel de red como una evolución del sistema de segunda generación GSM, pero con una nueva interfaz radio de mayor capacidad y eficiencia. En el resto del mundo, UMTS rivaliza con CDMA2000, el otro gran sistema 3G impulsado fundamentalmente por EE.UU, que es una evolución del primer sistema CDMA comercial definido por la compañía Qualcomm, y estandarizado por la organización norteamericana TIA con el nombre IS-95.

Las redes UMTS actualmente en operación se basan en un conjunto inicial de especificaciones del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) denominado Release 99. Debido a las limitaciones de esta primera versión del estándar UMTS, en los últimos años los operadores se han apresurado a introducir ciertas mejoras previstas para versiones posteriores. Se trata de las tecnologías HSPA (*High Speed Packet Access*) [131], término bajo el cual se agrupan un conjunto de extensiones al interfaz radio UMTS original encaminadas a mejorar las prestaciones tanto en sentido

descendente, caso de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), como en sentido ascendente, mediante HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*).

Las tecnologías HSDPA y HSUPA, definidas respectivamente en las *Releases* 5 y 6 del 3GPP, son ya realidad en un porcentaje importante de las redes UMTS en funcionamiento. Con ellas se posibilita alcanzar tasas de pico teóricas de hasta 14,4 Mbit/s en bajada y 5,7 Mbit/s en subida, respectivamente. Si bien en la práctica las velocidades que se obtienen son menores, las prestaciones que ofrecen son equiparables a las de una línea ADSL básica de 1-3 Mbit/s, y los operadores se esfuerzan por mejorarlas.

Se puede considerar que con la implantación de las tecnologías HSPA se produce la entrada a los sistemas de comunicaciones móviles 3^{ra} G. La evolución de los sistemas 3GPP no termina ahí, y los operadores ya están preparando la introducción de nuevas extensiones como HSDPA Evolucionado (también conocida como HSDPA+) y, a más largo plazo, LTE (*Long Term Evolution*). Estas mejoras marcarán la entrada en los sistemas 4G, barajándose caudales objetivo de decenas e incluso la centena de Mbit/s.

2.7.2 Estructura y elementos de red

La práctica totalidad de los sistemas UMTS en funcionamiento están basados en la arquitectura de red definida en las especificaciones *Release* 99 del 3GPP, inspirada en las redes GSM/GPRS. Dicha arquitectura, representada en la Figura 93, se compone de la red de acceso radio (UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y el núcleo de red (CN, *Core Network*).

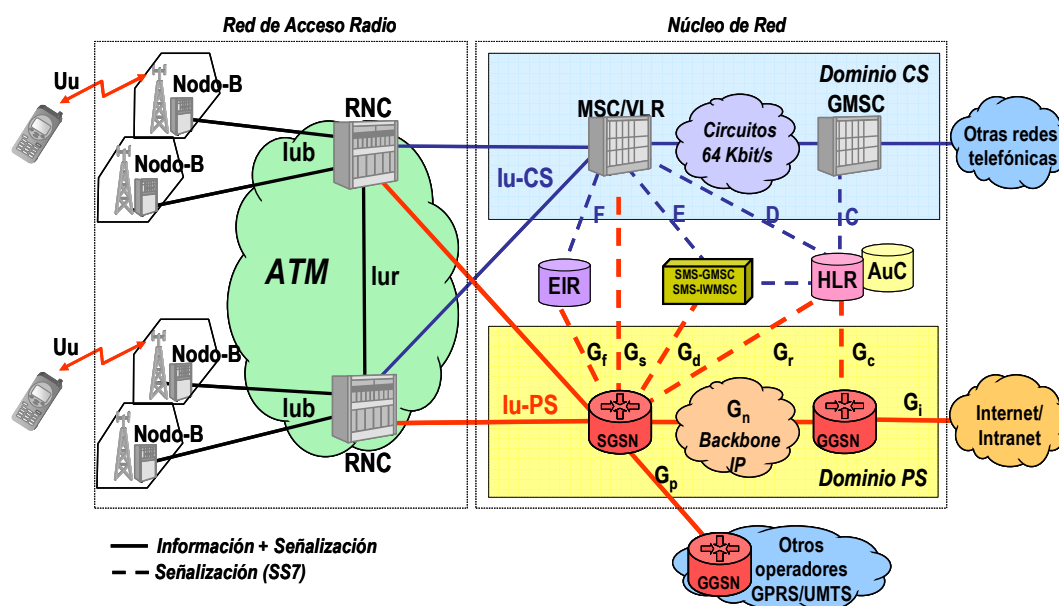


Figura 93. Arquitectura de red UMTS Release 99

Los terminales UMTS acceden al sistema a través de la interfaz radio Uu basada en tecnología WCDMA [132] (*Wideband Code Division Multiple Access*), sobre portadoras de 5 MHz de anchura espectral. Para la operación de UMTS en Europa se ha reservado espectro en una serie de bandas en torno a los 2 GHz.

Los enlaces ascendente y descendente se pueden soportar sobre una única portadora (TDD, *Time Division Duplex*) o dos (FDD, *Frequency Division Duplex*). Casi todas las redes UMTS en funcionamiento utilizan exclusivamente la opción FDD. Cada estación base UMTS, denominada Nodo-B, maneja uno o varios pares de portadoras, cada una de ellas soportando múltiples canales mediante el empleo de diferentes códigos CDMA. Más específicamente, la técnica de multiplexión por código utilizada es la variante DS-SS-SSA (*Direct Sequence Spread Spectrum*), con una velocidad de operación de 3,84 Mchip/s. La capacidad máxima agregada que se puede obtener sobre una portadora WCDMA de 5 MHz está en torno a los 2 Mbit/s. No obstante, esta capacidad se puede ampliar mediante el empleo de las tecnologías HSPA, tal como se describe en el apartado 2.7.3.2.

La red de acceso UTRAN consta de una serie de subsistemas de red radio, cada uno de ellos constituido por un controlador RNC (*Radio Network Controller*) y una serie de Nodos-B a su cargo. La infraestructura de transmisión que conecta estos equipos está basada en tecnología ATM [133] (*Asynchronous Transfer Mode*), si bien a partir de la *Release 5* se prevé la posibilidad de utilizar IP como alternativa (ver apartado 2.7.3.3).

La mayoría de los operadores han optado por el despliegue de una red de transporte ATM con conmutadores y enlaces de varios tipos (E1, E3, STM-1) en vez de considerar la interconexión directa de equipos UMTS. En la Figura 94 se muestra un ejemplo de realización de la UTRAN sobre transporte ATM.

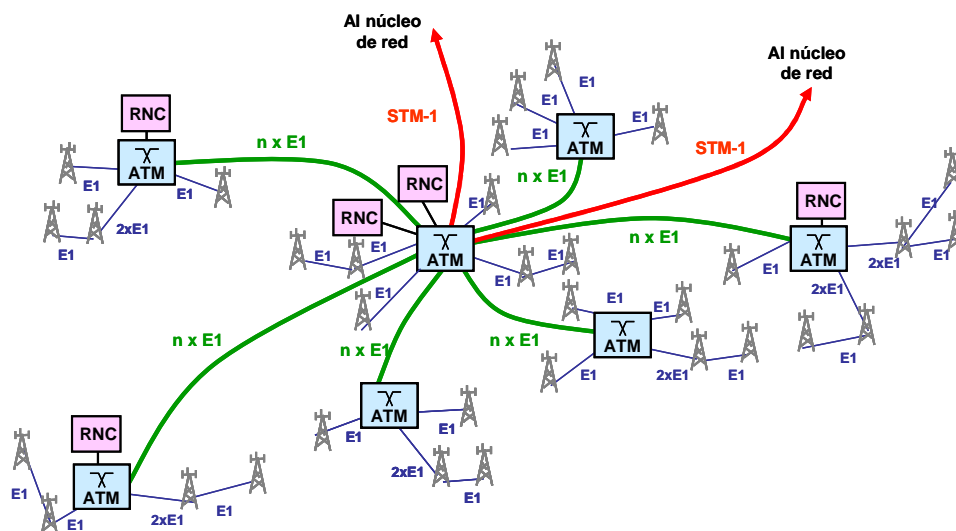


Figura 94. Ejemplo de topología de red de acceso UMTS

Por lo que al núcleo de red (CN) respecta, la *Release 99* plantea esencialmente la reutilización (con algunas modificaciones para el soporte de nuevos servicios) de la infraestructura disponible en las redes GSM/GPRS, dejando su evolución para fases posteriores (*Releases 4, 5 y sucesivas*). Así, en el núcleo de red UMTS se encuentran los elementos habituales del subsistema de conmutación de GSM/GPRS: los equipos de conmutación (MSCs y GSNs) y las bases de datos o registros (HLR, VLR, EIR, AuC). A continuación se proporciona un breve resumen de cada elemento.

- Equipos de conmutación:
 - a. MSCs (*Mobile Switching Centres*). Nodos de conmutación para el soporte de servicios modo circuito (dominio CS). Son esencialmente centrales telefónicas dotadas de funciones adicionales específicas para la gestión de movilidad (registro/desregistro, actualización de posición y autenticación y cifrado). Las MSCs están interconectadas a través de una red convencional de circuitos telefónicos de 64 kbit/s, así como una red de señalización SS7 (Signalling System 7). A través de ésta se establecen y liberan circuitos entre MSCs, y se accede a las distintas bases de datos del sistema (HLR, VLR, EIR). Las MSCs que se interconectan con otras redes telefónicas (fijas o móviles) reciben el nombre de GMSCs (*Gateway MSCs*).
 - b. SGSNs (*Serving GPRS Support Nodes*) y GGSNs (*Gateway GPRS Support Nodes*). Nodos de conmutación para el soporte de servicios modo paquete (dominio PS). Son esencialmente conmutadores de paquetes dotados de funciones adicionales para la gestión de movilidad similares a las incluidas en los MSCs. SGSNs y GGSNs están interconectados entre sí a través de una red IP. Los SGSNs actúan de nodos de acceso al núcleo de red, mientras que los GGSNs actúan de pasarelas hacia las redes externas (Internet, Intranets, portal de servicios del operador, etc.).
- Bases de datos:
 - c. HLR (*Home Location Register*): Es la base de datos principal del sistema, en la que se almacena la información de sus abonados (su identidad, servicios contratados, etc.). También contiene información parcial sobre la localización del móvil en red (VLR o SGSN donde está registrado).
 - d. VLR (*Visitor Location Register*): Almacena información temporal de los móviles que se encuentran bajo su área de influencia (normalmente la de una MSC). El VLR conoce el conjunto de células o área de localización en la que se encuentra el móvil.
 - e. EIR (*Equipment Identity Register*): Base de datos donde se almacena información relativa a terminales. Su principal utilidad es impedir el acceso a la red de terminales robados o con problemas técnicos que pudieran perjudicar a la red.
 - f. AuC (*Authentication Center*): Almacena de manera centralizada los parámetros relacionados con la seguridad y privacidad de las

comunicaciones. Esta información solamente reside en el AuC y en la tarjeta SIM (*Subscriber Identity Module*) incluida en el terminal de cada usuario.

Los nodos de conmutación y las bases de datos de los sistemas UMTS incorporan algunas funciones nuevas con respecto a sus homónimos de GSM/GPRS. En la práctica, dependiendo de las decisiones adoptadas por el operador y las soluciones ofrecidas por los suministradores, pueden ser equipos nuevos específicamente desarrollados para UMTS o equipos ya existentes debidamente actualizados con las nuevas funcionalidades.

La evolución de la arquitectura de los sistemas UMTS se aborda en las sucesivas *Releases* del 3GPP, analizadas con detalle en el apartado 2.7.3.

2.7.3 Normalización de sistemas UMTS

2.7.3.1 Especificaciones del 3GPP

La especificación del sistema UMTS y su evolución se llevan a cabo en el 3GPP [134] (*Third Generation Partnership Project*), alianza en la que participan organismos de normalización, representantes de mercado, observadores e invitados. Los organismos de normalización regionales miembros del 3GPP, ver Figura 95, tienen potestad para transponer las especificaciones técnicas del 3GPP en estándares o normas aplicables en una cierta región. En el caso de Europa, este papel lo desempeña ETSI.

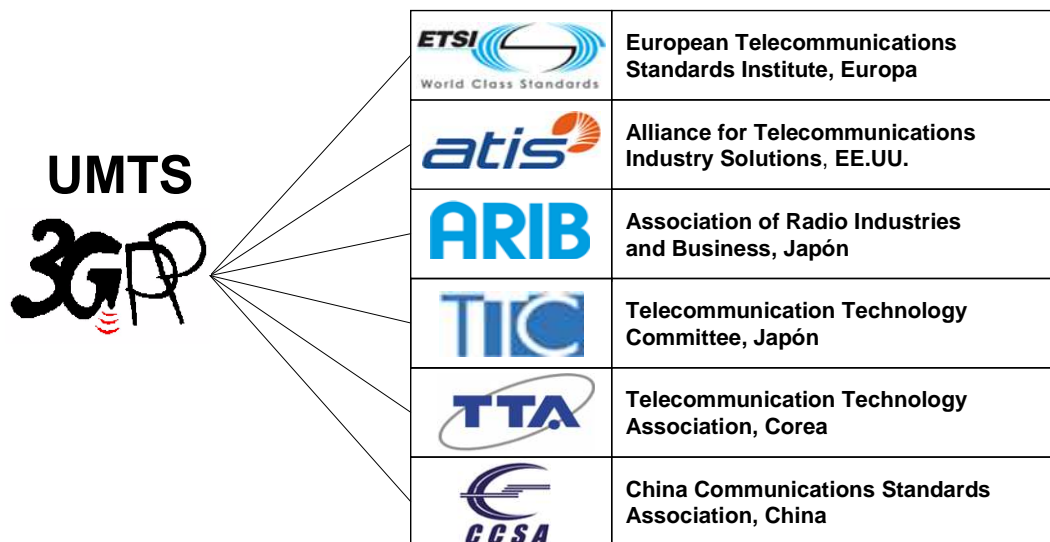


Figura 95. Organismos de normalización integrados en el 3GPP

Los representantes de mercado son organizaciones con capacidad reconocida para aconsejar sobre las necesidades del mercado. Entre ellos se encuentran los

siguientes: GSA (*Global mobile Suppliers Association*), GSMA (*GSM Association*), IPv6 Forum, UMTS Forum y UWCC. Dentro de los miembros observadores cabe citar ACIF (Australia), TIA (Estados Unidos) y TSACC (Canadá). Finalmente, entre los miembros invitados se encuentran numerosos operadores, fabricantes y universidades.

Las especificaciones del 3GPP están organizadas en *Releases*, las cuales definen fases sucesivas de evolución de los sistemas UMTS. Las especificaciones que componen cada *Release*, así como los borradores y documentos de trabajo, están disponibles públicamente en el servidor Web del 3GPP [134]. Las especificaciones se agrupan en quince series con las temáticas que se muestran en la Tabla 41. El índice de las especificaciones que componen cada *Release* está definido en la especificación TS 21.101 (actualizada convenientemente para cada *Release*).

Tabla 41. Series de especificaciones UMTS

Serie	Temática
21	Requisitos
22	Aspectos de servicios (stage 1)
23	Realización técnica (stage 2)
24	Señalización móvil-red (stage 3)
25	Aspectos radio
26	Codecs
27	Servicios de datos
28	Señalización UTRAN/Núcleo de red (stage 3)
29	Señalización en núcleo de red (stage 3)
30	Gestión del programa
31	Tarjetas SIM / USIM.
32	Operación y mantenimiento, tarificación
33	Aspectos de seguridad
34	Pruebas de terminales y tarjetas SIM/USIM
35	Algoritmos de seguridad
36	Interfaz radio evolucionado UTRA (LTE)

En la Figura 96 se indican las *Releases* consideradas hasta la fecha, junto con un breve resumen de las principales novedades que añaden. La *Release* 99 constituye el punto de partida en el que se basan todas las redes UMTS comerciales. Sobre esta base se han ido incorporando mejoras y funcionalidades definidas en las *Releases* 4, 5 y 6. Estas nuevas funcionalidades son en muchos casos de carácter opcional, por lo que la definición de los itinerarios concretos de evolución de las redes se realiza a partir del consenso entre los principales operadores y suministradores. Por último, la *Release* 7 y, especialmente, la 8, se encuentran en una fase embrionaria, siendo aún

muchos los aspectos técnicos por definir y concretar. En los apartados siguientes se abordan con mayor detalle los aspectos más relevantes que las sucesivas *Releases* establecen en la evolución de los sistemas 3GPP.

Rel 99 (mar 00)	<ul style="list-style-type: none"> • Red de acceso radio basada en WCDMA y ATM • Núcleo de red basado en GSM/GPRS
Rel 4 (mar 01)	<ul style="list-style-type: none"> • Dominio CS independiente de transporte (IP, ATM, ...) • Mejoras en interfaz radio, QoS en UTRAN, TDD 1,28 Mchip/s • Operación sin tándem (TFO)
Rel 5 (mar 02)	<ul style="list-style-type: none"> • Subsistema IP multimedia (IMS) • QoS extremo a extremo en dominio PS • Red de acceso IP • High Speed Downlink Packet Access (HSPDA)
Rel 6 (dic 04)	<ul style="list-style-type: none"> • IMS Fase 2 (mensajería instantánea, presencia, push to talk ...) • Servicios multimedia multicast/ broadcast (MBMS) • Interfuncionamiento con WLANs • Enhanced Uplink (HSUPA)
Rel 7 (dic 07)	<ul style="list-style-type: none"> • HSPA Evolution (HSPA+) • LTE (Long Term Evolution) • SAE (System Access Evolution)
Rel 8 (dic 08)	<ul style="list-style-type: none"> • Enhanced UTRAN (E-UTRAN) • Evolved Packet Core (EPC)

Figura 96. *Releases* del 3GPP

2.7.3.2 Mejoras de prestaciones: tecnologías HSPA

La tecnología radio empleada en los sistemas UMTS *Release* 99 presenta importantes limitaciones prácticas tanto en términos de prestaciones como de eficiencia, debido a la utilización exclusiva de canales radio dedicados para todo tipo de servicios²¹. Estos aspectos son especialmente críticos para el soporte de servicios modo paquete, ya que se traducen en un número reducido de usuarios por célula, así como en la necesidad de limitar el caudal máximo disponible por usuario.

El interfaz radio WCDMA proporciona una capacidad agregada de 2048 kbit/s por portadora, a repartir entre los usuarios de la célula (o sector). En consecuencia, los operadores UMTS se vieron obligados a reducir el caudal máximo de bajada a 384 kbit/s. Esto permite servir de forma práctica a unos tres usuarios a dicha velocidad y disponer aún de capacidad en la portadora para otros servicios: voz a 12,2 kbit/s,

²¹ La *Release* 99 define canales compartidos, pero su implementación conforme a las especificaciones plantea dificultades prácticas. En la *Release* 5 se define un nuevo tipo de canal compartido, adecuado para HSDPA.

videotelefonía 64 kbit/s) y datos a otras velocidades (16, 32, 64, ó 128 kbit/s). Claramente se ve que este enfoque implica un límite muy rígido al número de usuarios por célula, especialmente cuanto mayor es la tasa de bit considerada. A ello ha de sumarse la ineficiencia que supone asignar canales radio dedicados para servicios de datos, no pudiendo aprovechar los períodos de inactividad de un usuario (por ejemplo, el tiempo de lectura de una página Web) para dar servicio a otros usuarios. Se trata, en definitiva, de una solución poco eficiente y no escalable de cara a considerar el acceso generalizado a servicios y aplicaciones Internet.

Con objeto de resolver las mencionadas limitaciones, las sucesivas *Releases* del 3GPP plantean la introducción de mejoras para el acceso a servicios modo paquete. Estas mejoras, genéricamente tecnologías HSPA (*High Speed Packet Access*), se describen en los apartados siguientes.

2.7.3.2.1 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)

La tecnología HSDPA [135] definida en la *Release* 5 del 3GPP, permite ampliar el caudal de bajada para servicios modo paquete hasta 14,4 Mbit/s (teóricos) mediante la introducción de nuevas funcionalidades en la red de acceso UMTS. Estas novedades traen consigo, además, una reducción de la latencia y el uso más eficiente del interfaz radio. Se trata pues de una solución atractiva tanto para los usuarios como para los operadores.

Las nuevas características en las que se apoya HSDPA se pueden resumir en el empleo de un nuevo canal descendente compartido HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*), junto con una serie de funcionalidades añadidas al Nodo-B que se agrupan bajo una nueva capa de control de acceso al medio MAC-hs. Dichas funciones incluyen un mecanismo de planificación rápida de paquetes junto con el empleo de modulación y codificación adaptativa (AMC) y un esquema de retransmisiones híbrido (H-ARQ). A continuación se describen con más detalle estas características.

En la Figura 97 se ilustra la compartición dinámica del canal HS-DSCH entre los usuarios de HSDPA de una célula. Para las comunicaciones en sentido ascendente, los terminales mantienen el empleo de canales dedicados DCH (*Dedicated Channel*).

El canal descendente compartido HS-DSCH es un nuevo canal de transporte al que pueden asociarse uno o más canales físicos (códigos OVSF) con factor de expansión SF (*spreading factor*) fijo de valor 16. Este valor de SF permite la utilización de hasta 15 códigos para el canal HS-DSCH sobre una portadora WCDMA de 5 MHz. El operador puede dedicar una portadora completa a HSDPA o bien compartirla con servicios UMTS *Release* 99, siendo la segunda opción la más habitual en los despliegues iniciales de HSDPA. Este aspecto es importante ya que el número de códigos disponibles para HSDPA limita el caudal máximo de bajada en la célula.

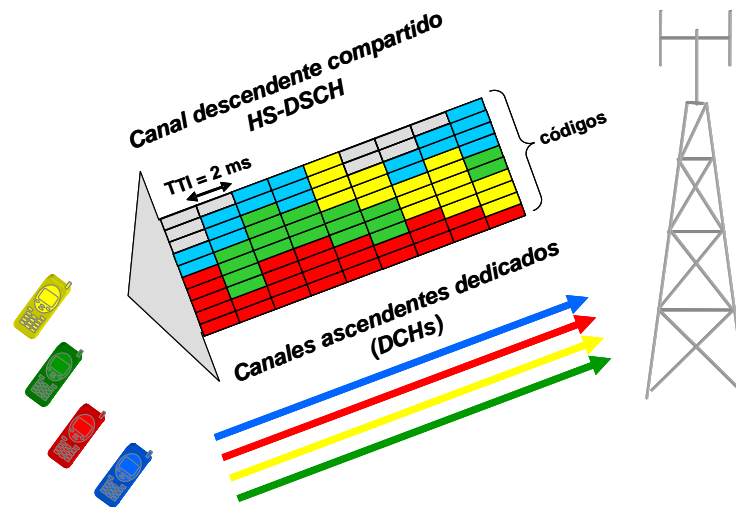


Figura 97. Multiplexión de usuarios HSDPA por tiempo y códigos

El canal HS-DSCH se comparte dinámicamente entre los usuarios HSDPA de la célula bajo el control de un algoritmo de planificación (*scheduling*) rápido gestionado en el Nodo-B. La asignación de recursos se efectúa con una granularidad de 2 ms, siendo éste el valor del parámetro TTI (*Time Transmission Interval*) empleado en el HS-DSCH. Dicho valor es cinco veces menor que el usado en UMTS Release 99, lo que supone quintuplicar la tasa de bit a nivel físico.

La elección del algoritmo de planificación es clave en HSDPA ya que puede determinar el comportamiento general del sistema, y por tanto su rendimiento. Su misión básica es determinar en cada TTI qué terminal o terminales transmiten en el HS-DSCH, la potencia de transmisión y cuántos códigos se les asignan. El criterio que sigue el algoritmo de planificación se basa en parámetros como la calidad del enlace radio del usuario (CQI, *Channel Quality Indicator*), la categoría del terminal (ver Tabla 42) y la cantidad de paquetes encolados. HSDPA permite que un mismo usuario pueda emplear varios códigos en el mismo TTI, así como que en un mismo TTI se multiplexen códigos asignados a distintos usuarios, tal como se muestra en la Figura 97.

Las especificaciones dejan libertad para que el operador escoja el mecanismo de planificación que mejor se adapte a sus necesidades. Entre los distintos mecanismos propuestos cabe destacar los siguientes: Round Robin (RR), *Maximum Carrier to Interference* (Max C/I), y *Proportional Fair* (PF). El algoritmo más utilizado es PF (con variantes específicas de cada suministrador) seguido del Max C/I. Cabe mencionar la existencia de variantes de los mecanismos citados encaminadas al soporte de distintos perfiles de calidad de servicio (por ejemplo, niveles de prioridad).

Otra característica avanzada de HSDPA es el empleo de un mecanismo AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) que permite adaptar en cada TTI el tipo de modulación (QPSK ó 16QAM) y el esquema de codificación según la calidad individual del enlace radio entre el terminal y el Nodo-B.

HSDPA permite el empleo del mismo esquema de modulación que UMTS Rel-99, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), o bien si las condiciones radio lo permiten, el esquema de modulación avanzado 16QAM (16 *Quadrature Amplitude Modulation*). Este último permite el envío de cuatro bits por símbolo, el doble que con QPSK, lo que supone duplicar la tasa de bit. Este aumento, no obstante, va acompañado de una menor inmunidad a interferencias y ruido, por lo que el uso de 16QAM sólo es factible en condiciones de canal muy favorables (terminal estático y próximo al Nodo-B).

El esquema de codificación de canal también puede adaptarse según las condiciones radioeléctricas. Los esquemas se distinguen por el empleo de diferentes proporciones de bits de protección frente a errores (FEC) y de bits de información que se transmiten, lo que se traduce en distintas tasas de bit efectivas. Estas proporciones oscilan entre $1/6$ y $0,98$ (a veces denotada $4/4$, prácticamente sin redundancia). En la práctica, las proporciones que se utilizan están entre $1/4$ y $3/4$.

En la Figura 98 se ilustra el funcionamiento del mecanismo AMC. En condiciones adversas, típicamente en movimiento o lejos del Nodo-B, se recurre a modulación QPSK y una tasa de codificación baja. A medida que las condiciones mejoran, cabe emplear tasas de codificación mayores y modulación 16QAM.

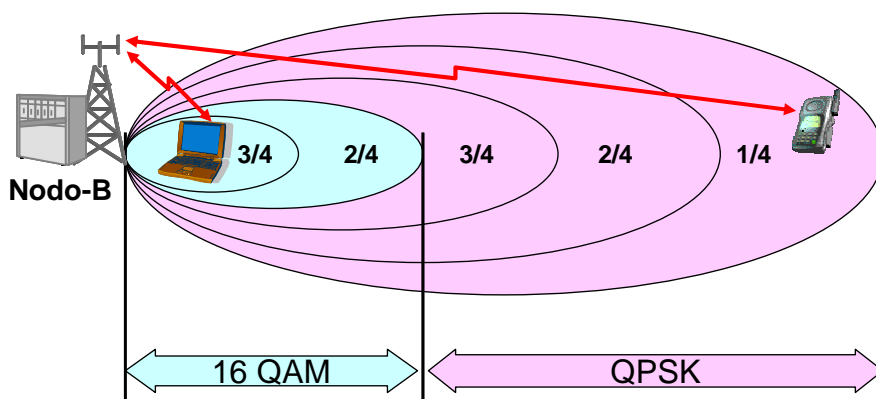


Figura 98. Modulación y codificación adaptativa con HSDPA

Otra funcionalidad que incorpora el Nodo-B para el soporte de HSDPA es HARQ (ARQ híbrido), un mecanismo avanzado de retransmisiones entre terminal y Nodo-B basado en el empleo de uno o varios procesos de parada-espera en paralelo (hasta ocho). El hecho de que las retransmisiones sean entre terminal y Nodo-B, en vez de entre terminal y RNC como en UMTS Rel-99, junto con el empleo de un TTI menor (2 ms frente 10 ms), permite que las retransmisiones sean más ágiles, lo que se traduce en una menor latencia (en torno a un orden de magnitud menos). Así mismo, se obtiene un ahorro significativo de recursos en el interfaz Iub al reducirse las retransmisiones sobre el mismo a los casos en donde fallen las retransmisiones de la capa física o se supere el número máximo de reintentos (en estos casos, entra

en juego el mecanismo de retransmisiones RLC convencional de UMTS, entre terminal y RNC).

El término híbrido hace referencia al empleo de una estrategia de combinación de la información retransmitida y los bloques erróneos previamente recibidos. A la hora de reenviar la información, HSDPA contempla dos mecanismos: *Chase Combining* (CC) e *Incremental Redundancy* (IR). En el primero, en cada retransmisión se envía exactamente la misma información que en el bloque original. Combinando los distintos bloques recibidos, típicamente con distintos errores, se obtiene diversidad temporal. En el método IR la retransmisión consiste sólo en un conjunto de bits que proporcionan información de redundancia incrementalmente. Este método requiere mayor memoria en el terminal, por lo que sólo es adecuado cuando se emplean tasas de codificación reducidas.

Los terminales HSDPA se clasifican en 12 categorías, cuyas características se detallan en la Tabla 42.

Tabla 42. Categorías de terminales HSDPA

Categoría	Modulación	Códigos paralelos	Intervalo inter- TTIs	Bits por TTI	ARQ a tasa máx.	Caudal Máximo (Mbit/s)
1	QPSK/16QAM	5	3	7298	CC	1,2
2	QPSK/16QAM	5	3	7298	IR	1,2
3	QPSK/16QAM	5	2	7298	CC	1,8
4	QPSK/16QAM	5	2	7298	IR	1,8
5	QPSK/16QAM	5	1	7298	CC	3,6
6	QPSK/16QAM	5	1	7298	IR	3,6
7	QPSK/16QAM	10	1	14411	CC	7,2
8	QPSK/16QAM	10	1	14411	IR	7,2
9	QPSK/16QAM	15	1	20251	CC	10,2
10	QPSK/16QAM	15	1	27952	IR	14,4
11	QPSK	5	2	3630	CC	0,9
12	QPSK	5	1	3630	CC	1,8

Las diferencias entre cada categoría, que se traducen en caudales máximos que oscilan entre 0,9 Mbit/s y 14,4 Mbit/s, vienen determinadas por los siguientes parámetros: modulaciones soportadas (QPSK/16QAM), número máximo de códigos paralelos (5, 10 ó 15), número mínimo de intervalos de espera entre TTI, número máximo de bits de transporte por TTI (según tasas de codificación soportadas), y tipo de ARQ soportado a tasa máxima (CC o IR).

2.7.3.2.2 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)

En la *Release 6* del 3GPP se aborda la mejora de prestaciones del interfaz radio en sentido ascendente mediante la tecnología *Enhanced Uplink* [136], a la que también se denomina de manera no oficial HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). De manera similar a HSDPA, la tecnología HSUPA recurre a la combinación de una serie de técnicas avanzadas, lo que permite ampliar el caudal de subida de las redes UMTS hasta 1,4 Mbit/s en la primera fase y hasta velocidades de 5,76 Mbit/s con la segunda. En la *Release 7* está previsto ampliar el caudal de subida a 7,2 Mbit/s con la categoría 7.

HSUPA define un nuevo tipo de canal dedicado ascendente denominado E-DCH (*Enhanced Dedicated Channel*). El envío de información sobre este canal está sujeto a un procedimiento de petición/asignación de recursos entre terminales y el Nodo-B. Este aspecto se materializa en la inclusión una nueva capa MAC-e tanto en el terminal como en el Nodo-B.

Las mayores tasas de bit empleadas sobre el canal E-DCH exigen el empleo de un mecanismo rápido de control de potencia. A partir de medidas, este mecanismo estima la interferencia causada por los terminales HSUPA en la célula. Dicha información es tenida en cuenta por el algoritmo de planificación rápido (con TTIs de 2 ó 10 ms) del Nodo-B a la hora de asignar recursos a los terminales. El empleo de TTIs reducidos permite una adaptación rápida del enlace, al tiempo que se reduce la latencia en sentido ascendente. A ello contribuye también el uso de un mecanismo H-ARQ con redundancia incremental, extendido para soportar la comunicación simultánea del terminal con varios Nodos-B, esto es, en situaciones de *soft-handover* (tarspaso suave). Al igual que en HSDPA, en HSUPA se definen varias categorías de terminal con características y prestaciones diferentes, tal como se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43. Categorías de terminales HSUPA

Categoría	Códigos paralelos	TTI (ms)	Bits por TTI	Caudal Máx. (Mbit/s)
1	1xSF4	10	7296	0.73
2	2xSF4	10	14592	1.46
	2xSF4	2	2919	1.46
3	2xSF4	10	14592	1.46
4	2xSF2	10	20000	2.00
	2xSF2	2	5837	2,93
5	2xSF2	10	20000	2.00
6	2xSF2+2xSF4	10	20000	2.00
	2xSF2+2xSF4	2	11520	5,76

2.7.3.2.3 HSPA Evolucionado (HSPA+)

En las especificaciones de las *Releases* 7 y 8 del 3GPP se abordan distintas mejoras a las tecnologías HSPA. Entre ellas se considera el uso de MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), lo que implica utilizar varias antenas para conseguir mayores tasas de bit aprovechando la propagación multitrayecto. Más específicamente, en la *Release* 7 se define una solución basada en el empleo de dos antenas tanto en el terminal como en el Nodo-B que permite alcanzar velocidades teóricas de hasta 28,8 Mbit/s. Adicionalmente, se considera el empleo de modulaciones de mayor orden (64QAM), con lo que se esperan conseguir caudales de bajada de hasta 42 Mbit/s y de subida de hasta 11 Mbit/s.

Otra serie de innovaciones adicionales de HSPA+ están encaminadas a conseguir una mayor duración de las baterías, así como la inclusión de la funcionalidad CPC (*Continuous Packet Connectivity*). Dicha funcionalidad pretende reducir al mínimo las desconexiones y reestablecimientos de conexión de las soluciones anteriores. Gracias a CPC, se espera mejorar las prestaciones tanto de los servicios de datos, con una calidad equiparable a la de las líneas ADSL, como a los servicios de voz. Respecto a estos últimos, el objetivo es facilitar el soporte del servicio telefónico mediante VoIP (voz sobre IP), duplicando la capacidad del sistema en comparación con las redes UMTS *Release* 99.

La tecnología HSPA+ se considera el siguiente salto en la evolución de los sistemas 3GPP, estando prevista su comercialización a partir del 2009. A más largo plazo, está previsto ampliar aun más las prestaciones de acceso radio mediante la tecnología LTE, descrita en el apartado 2.7.3.4.

2.7.3.3 Evolución hacia arquitectura Todo-IP

Como se ha indicado, el punto de partida de los sistemas UMTS actuales es la arquitectura definida en la *Release* 99 del 3GPP. Dicha arquitectura, inspirada en la de GSM/GPRS, combina distintas tecnologías de conmutación: células ATM para la UTRAN, circuitos de 64 kbit/s para el dominio CS y paquetes IP para el dominio PS. En las sucesivas *Releases* del 3GPP, se aborda la progresiva migración hacia una arquitectura homogénea basada exclusivamente en tecnología IP.

En la Figura 99 se ilustra la migración progresiva de los sistemas UMTS/3GPP hacia una arquitectura Todo-IP (*All-IP*) a lo largo de las distintas *Releases*. Los hitos más significativos en esta migración son los siguientes:

- Migración del dominio CS a IP: El primer paso hacia el concepto de red Todo-IP se da en la *Release* 4, donde se define una nueva arquitectura [137] para el dominio CS, inspirada en las redes de telefonía IP. Básicamente, se trata de reemplazar las centrales telefónicas y la red de circuitos que las interconecta por pasarelas de medios y controladores de pasarelas interconectados mediante una red IP.

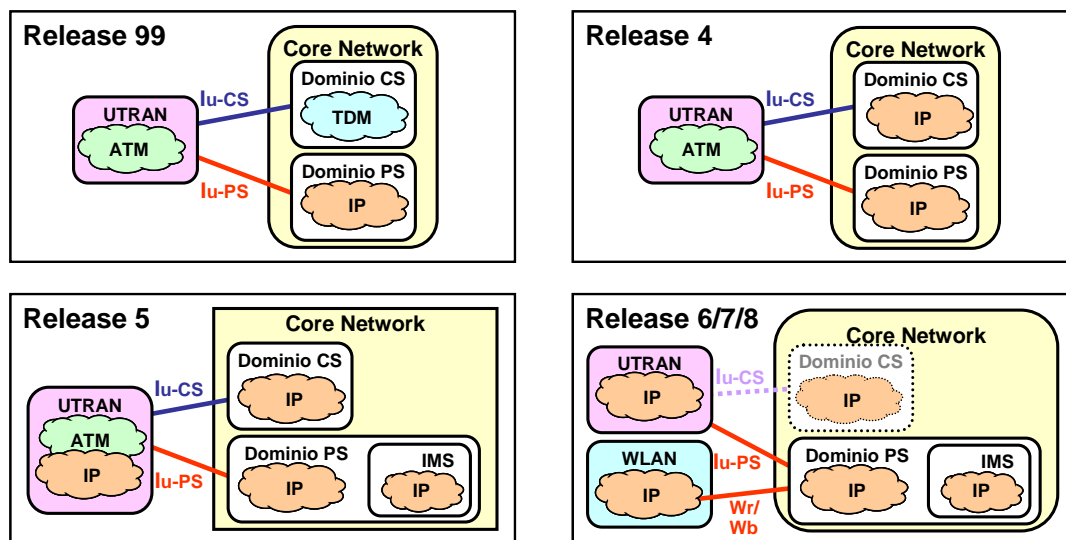


Figura 99. Evolución hacia arquitectura Todo-IP

- Red de acceso IP: En la *Release 5* se allana aún más el camino hacia la arquitectura Todo-IP mediante la definición de una solución para la UTRAN basada en IP, denominada IP-RAN [138], como alternativa al empleo de ATM establecido en la *Release 99*. El reemplazo de IP por ATM no es trivial, siendo la solución propuesta compleja y planteándose dudas sobre su implantación en red.

No obstante, los operadores tienen interés en introducir soluciones IP en la red de acceso, motivo por el cual en las *Releases 7 y 8* se mantiene el interés en definir soluciones que faciliten el despliegue de redes Todo-IP. Estas soluciones, como se verá en el apartado 2.7.3.4, tienen como punto de partida la definición de una nueva arquitectura de red simplificada con un menor número de elementos.

- Subsistema IP Multimedia (IMS): Dentro de la *Release 5*, destaca la introducción en el núcleo de red del Subsistema IP Multimedia [139] (IMS). El IMS se plantea como una red IP más a la que se puede acceder a través del dominio PS. Su objetivo es facilitar el soporte de servicios multimedia basados en IP (por ejemplo, telefonía IP o videotelefonía sobre IP), basándose en los protocolos de transporte y señalización por excelencia normalizados para este tipo de aplicaciones por el IETF: RTP [140] (*Real Time Protocol*) y SIP [141] (*Session Initiation Protocol*).

La *Release 5* define una primera fase del IMS, centrada en las aplicaciones multimedia en tiempo real (ej. telefonía, videoconferencia). Por su parte, en la *Release 6* se define una segunda fase en la que se contemplan otros servicios, tales como la mensajería instantánea, indicación de presencia y *push-to-talk*. En la Figura 100 se ilustran los escenarios de comunicación previstos por el IMS.

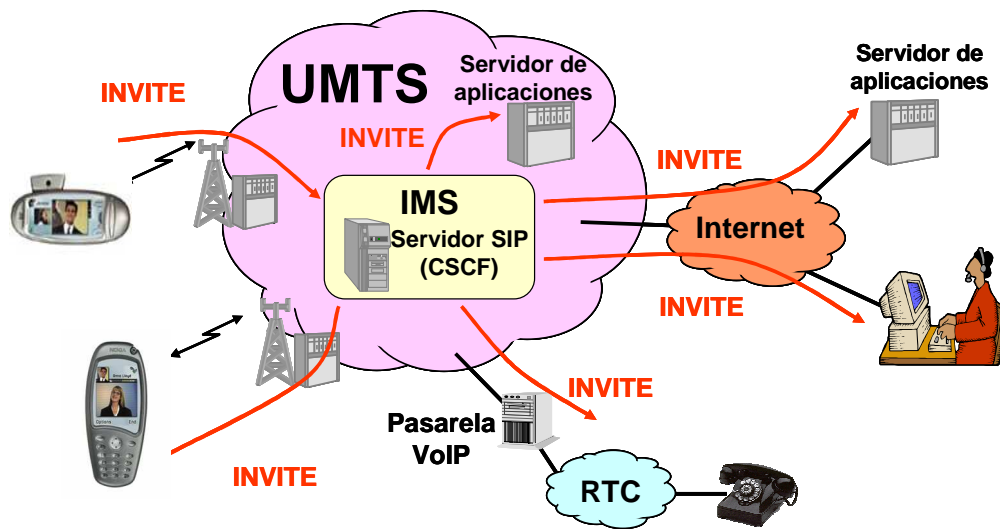


Figura 100. Escenarios de comunicación IMS

- Interfuncionamiento con WLAN y otras tecnologías inalámbricas: La aparición de otras tecnologías de acceso inalámbrico como Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi y WiMAX, ha dado lugar a plantear escenarios de interfuncionamiento con sistemas 3GPP. Este tipo de soluciones se plantea por primera vez en la *Release 6*, donde se definen hasta seis escenarios de interfuncionamiento entre UMTS y WLANs [108]. En la Figura 101 se muestra un ejemplo de escenario de interfuncionamiento que permite proporcionar un servicio de acceso a Internet mediante WLAN en un *hot-spot* (por ejemplo, un aeropuerto).

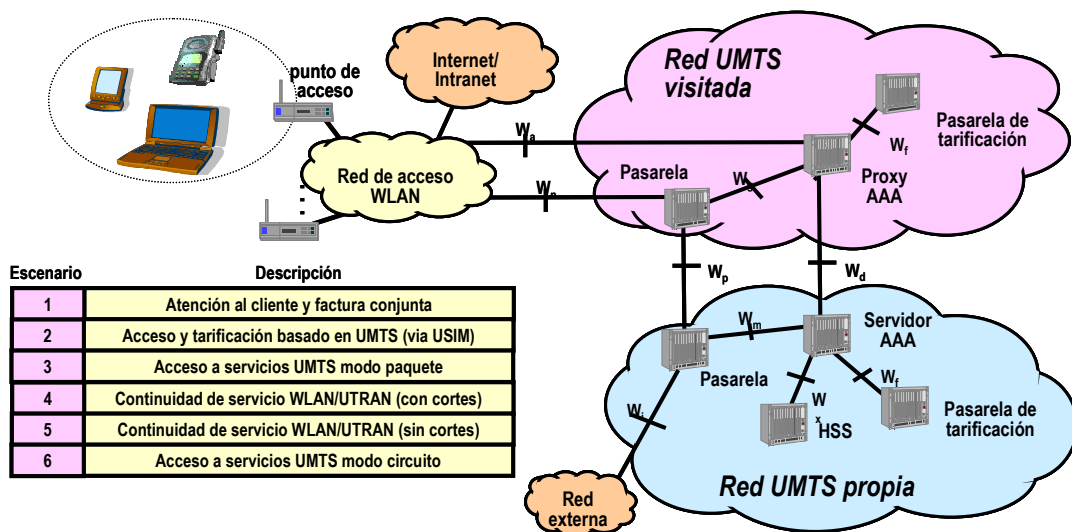


Figura 101. Interfuncionamiento entre UMTS y WLAN

El acceso a Internet lo proporciona el operador WLAN, mientras que los aspectos relativos a la autenticación del usuario y la tarificación del servicio se efectúan en la red UMTS.

Más recientemente, dentro de las *Releases* 7 y 8, se estudia extender los escenarios de interfuncionamiento entre sistemas 3GPP y otros tipos de redes inalámbricas, tales como redes PAN (*Personal Area Networks*) y WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*). La evolución a Todo-IP tiene su continuación, a más largo plazo, en la nueva arquitectura avanzada que se establece a partir de las *Releases* 7 y 8, a la que se dedica el siguiente apartado.

2.7.3.4 Evolución a largo plazo: LTE/SAE

Dentro de los objetivos de la *Release* 8 del 3GPP se aborda la especificación de un nuevo sistema de altas prestaciones basado exclusivamente en técnicas de conmutación de paquetes, denominado EPS (*Enhanced Packet System*). A diferencia de las *Releases* anteriores, donde la evolución se plantea en términos de mejoras sobre los sistemas precedentes, el EPS se define como un sistema completamente nuevo. Con ello, se pretende eliminar las deficiencias derivadas de la reutilización de funciones o elementos definidos en versiones anteriores de sistemas 3GPP.

El sistema EPS pretende dar un salto cuantitativo hacia caudales del orden de cientos de Mbit/s, y latencias del orden de los 10ms, considerándose la puerta de entrada a la generación 4G. En gran parte, la definición del nuevo sistema es la respuesta del 3GPP a los planes de evolución de otros sistemas de la competencia, como CDMA2000 y WiMAX.

El punto de partida del sistema EPS son los estudios LTE (*Long Term Evolution*) y SAE (*System Architecture Evolution*) desarrollados en la *Release* 7 del 3GPP. Los resultados de estos dos estudios constituyen la base de la definición, ya dentro de la *Release* 8, de la E-UTRAN (*Enhanced UTRAN*) y el EPC (*Enhanced Packet Core*), respectivamente.

Un aspecto clave para la consecución de las elevadas tasas de bit propuestas ha sido la selección de las tecnologías radio adecuadas. En este sentido, en el estudio LTE se acuerda abandonar WCDMA y apostar por el empleo de OFDMA²² (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*). Esta selección va acompañada de la posibilidad de utilizar un ancho de banda flexible entre 1,25 MHz y 20 MHz. La elección de OFDM para el camino descendente de LTE se justifica en base a la posibilidad de utilizar portadoras de mayor ancho de banda, ya que si se mantuviera la canalización actual de 5 MHz, no habría diferencias importantes en capacidad y eficiencia entre OFDM y WCDMA/HSDPA. Con todo ello, se espera alcanzar caudales máximos de hasta 100 Mbit/s en bajada y 50 Mbit/s en subida. Esto supone multiplicar por 2-3 veces (dependiendo de la configuración utilizada) la eficiencia espectral que presenta actualmente la *Release* 6 de HSPA.

²² Más precisamente, OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) para el ascendente.

Otro aspecto clave del EPS es la simplificación de la arquitectura de red. Como se ha visto, los sistemas UMTS actuales mantienen una arquitectura heredada de GSM/GPRS, lo que se traduce en la existencia de un número considerable de elementos: Nodos-B, RNCs, SGSNs, y GGSNs. Al incrementarse las tasas de bit del interfaz radio, esta sucesión de elementos se convierte en un serio inconveniente, dificultando que la mejora de prestaciones se perciba extremo a extremo. Con objeto de evitar que el cuello de botella sea la red, la nueva arquitectura del EPS apuesta por la minimización del número de elementos involucrados.

La simplificación de arquitectura afecta tanto a la red de acceso como al núcleo de red. Así, en la E-UTRAN (LTE) destaca la desaparición del RNC, traspasándose las funciones propias de éste al eNodo-B (*enhanced Node-B*), mientras que en el núcleo de red EPC (SAE) se elimina la distinción entre SGSN y GGSN, fusionados en un único elemento AGW (*Access Gateway*). Este resultado puede verse como la maduración de las ideas consideradas en las tecnologías HSPA, donde la mejora de eficiencia pasaba por la introducción de nuevas funciones en el Nodo-B. En la Figura 102 se compara la arquitectura actual de los sistemas 3GPP con la nueva arquitectura EPS definida en la *Release 8*.

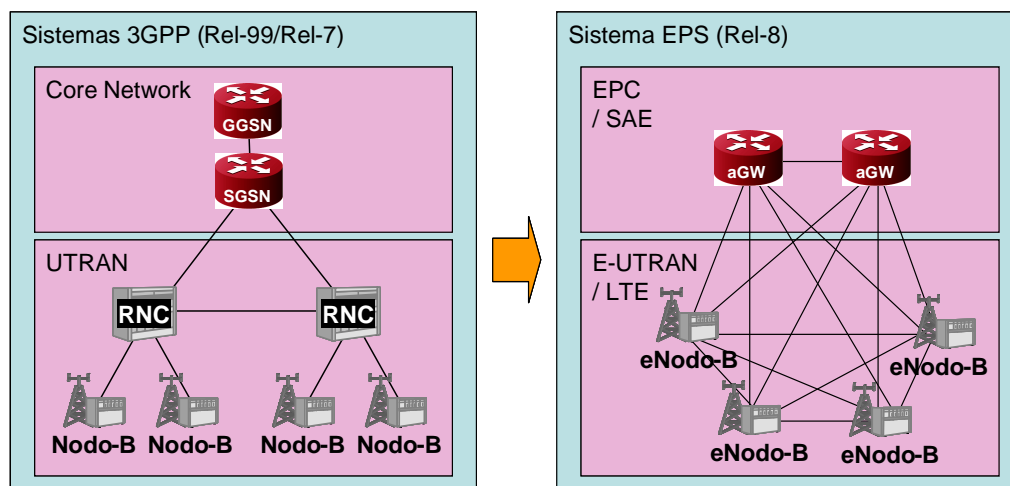


Figura 102. Simplificación de arquitectura de red

El hecho de que EPS se plantee como un nuevo sistema no implica que no se prevea el interfuncionamiento con sistemas anteriores. De hecho, las especificaciones consideran dicho interfuncionamiento no sólo con sistemas 3GPP (GERAN, UTRAN, HSPA), si no también con redes de acceso basadas en tecnologías desarrolladas por otros organismos (Wi-Fi, Bluetooth, WIMAX).

Cabe señalar que en la migración de los actuales sistemas UMTS-HSPA hacia la tecnología LTE se está considerando la posibilidad de reutilizar estaciones bases ya existentes dotadas de tecnología SDR (*Software Defined Radio*). Esta tecnología permite el empleo de una plataforma hardware común capaz de soportar distintos interfaces radio (GSM, UMTS y LTE) mediante una actualización software.

Finalmente, cabe señalar que la nueva arquitectura simplificada EPS tienen gran parecido con las de otros sistemas como CDMA2000 y WiMAX en los que no se partía de una arquitectura de red heredada.

2.7.4 Madurez de la tecnología y del mercado

A pesar de los retrasos iniciales, la tecnología UMTS ha alcanzado unos niveles de implantación bastante significativos. Así, según [142] [143] [144], a principios de 2009 el número total de usuarios UMTS en el mundo superaba los 300 millones, con más de 250 redes operando comercialmente en unos 100 países. Estas cifras suponen alrededor del 72% de la cuota total de mercado de las redes 3G, correspondiendo el 28% restante esencialmente al sistema CDMA2000 y sus variantes.

La mayoría de operadores UMTS lo son también de GSM, y los terminales UMTS soportan ambas tecnologías. Este aspecto, junto a algunas limitaciones iniciales del servicio UMTS (por ejemplo, cobertura reducida, mayor consumo de baterías, problemas con traspasos 2G/3G), han contribuido a que muchos terminales 3G se usen como terminales 2G. Como resultado, el crecimiento del tráfico 3G en los primeros años de operación de las redes UMTS fue sensiblemente menor de lo previsto. La situación ha mejorado ligeramente al ampliarse la cobertura y al optimizarse el servicio y los terminales. El verdadero punto de inflexión se ha producido con la introducción de las tecnologías HSPA, que ha supuesto el despegue decisivo de los sistemas UMTS/3GPP.

Los principales operadores ya ofrecen en sus redes las tecnologías HSPA desde 2006. En concreto, el 90% de las redes UMTS ofrece HSDPA y el 20% HSUPA, estimándose en unos 85 millones los usuarios de estas tecnologías a comienzos de 2009, con un ritmo de crecimiento de unos 4 millones de usuarios por mes. La implantación de estas tecnologías ha incrementado notablemente el consumo de tráfico en las redes UMTS. De hecho, se estima que el tráfico HSPA constituye alrededor del 70% del tráfico total de dichas redes.

En cuanto a la disponibilidad de terminales UMTS, la oferta abarca unos 800 dispositivos incluyendo teléfonos, dispositivos de mano, tarjetas PCMCIA, módems USB, e incluso dispositivos integrados en ordenadores portátiles. En el caso de HSPA, la oferta de dispositivos se acerca a los 400 modelos.

La mayoría de operadores UMTS que no han implantado HSPA tienen previsto hacerlo a corto plazo, al tiempo que los que ya lo han hecho se esfuerzan por mejorar las prestaciones e incluso algunos se preparan para la introducción de HSDPA+. Está previsto que estos servicios se empiecen a ofrecer a lo largo del 2009. Por lo que la implantación de E-UTRAN/LTE se refiere, se prevé que su comercialización se inicie alrededor de 2010. La mayor parte de los operadores 3G han indicado ya su preferencia por esta tecnología, incluyendo a los operadores actuales de CDMA 2000.

El lanzamiento comercial de UMTS en España se produjo en 2004, año en el que comenzaron a dar servicio Telefónica (Movistar), Vodafone, y France Telecom España (Orange, por entonces, Amena). En 2006 se sumó a la oferta de UMTS Xfera,

operando bajo la marca Yoigo. Por lo que a HSPA respecta, Telefónica, Vodafone y Orange ofrecen el servicio HSDPA desde 2006, y HSUPA desde 2007. En el caso de Yoigo, mediante un acuerdo de roaming con Telefónica, los servicios HSPA se prestan desde 2008.

La evolución del mercado de las comunicaciones móviles en España puede seguirse a partir de los informes trimestrales [145] publicados por la CMT (Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones). En la Tabla 44 se representan los principales datos de mercado comparando los años 2007 y 2008. Por lo que a cuota de mercado se refiere, en el tercer trimestre de 2008 el reparto entre operadores era el siguiente: Movistar 45,5%, Vodafone 33,6%, Orange 19,3%, Yoigo 1%, correspondiendo el 0,6% a los operadores móviles virtuales (ver apartado 2.7.7).

Tabla 44. Mercado de comunicaciones móviles en España

	Oct. 2007	Oct. 2008
Terminales	47.606.596	49.688.182
Móviles de contrato	27.056.820	29.463.233
Móviles de prepago	20.549.776	20.224.949
Tarjetas de datos	554.218	1.056.332
UMTS	314.153	574.201
HSDPA	240.065	482.131
Total de líneas	48.160.814	50.744.514
Penetración	103,3%	109,9%

Cabe señalar el Plan de Extensión de la Telefonía Móvil del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, desarrollado entre 2005 y 2008, que ha propiciado la mejora de cobertura de telefonía móvil y de la calidad de este servicio para más de 1,5 millones de habitantes del ámbito rural y para determinadas áreas estratégicas. Tras la finalización del plan, la cobertura de GSM/GPRS alcanza el 99% de la población y la de UMTS se sitúa en torno al 80%. Así mismo, cabe destacar también los planes de dicho Ministerio para autorizar la prestación de servicios 3G en las bandas de 900 MHz y 1.800 MHz, actualmente utilizadas para GSM.

2.7.5 Prestaciones

En los despliegues iniciales de UMTS, basados en las especificaciones *Release 99* del 3GPP, los caudales máximos por usuario están limitados a 384 kbit/s en bajada y 64 kbit/s en subida. Estas velocidades suponen una mejora considerable frente a las ofrecidas en GPRS, en torno a los 50 kbit/s en bajada y a los 10 kbit/s en subida²³.

²³ El caudal máximo teórico de GPRS es de 171 kbit/s, pero en la práctica la mayoría de los terminales no soporta más de 40-50 kbit/s.

La tecnología HSDPA permite, gracias a la combinación de las distintas técnicas avanzadas descritas en el apartado 2.7.3.2.1, ampliar el caudal máximo de bajada hasta los 14,4 Mbit/s. Esta cifra requiere la disponibilidad de una portadora WCDMA de 5 MHz (15 códigos) dedicada en exclusiva a HSDPA, el empleo de modulación 16QAM y una tasa de codificación 4/4. Dado que esta tasa sólo es factible bajo condiciones de propagación óptimas (de laboratorio), es frecuente encontrar en la literatura cotas máximas de operación entre 10 y 11 Mbit/s.

En la práctica, los caudales que se obtienen con HSDPA son sensiblemente menores debido a las condiciones de propagación, la configuración de la célula, la compartición del canal entre varios usuarios y las limitaciones del terminal. En general, para obtener caudales elevados en HSDPA es necesario que las condiciones del canal radio sean buenas (C/I alto) y estables. Habitualmente esto sólo sucede en las proximidades del Nodo-B y bajo condiciones de movilidad reducida del terminal. Conforme aumenta la distancia, el fenómeno de desvanecimiento impide transmitir las señales con mucho nivel de potencia.

La velocidad máxima alcanzable depende tanto de la categoría del terminal utilizado como del número de códigos HSDPA disponibles en la célula. Actualmente es frecuente encontrar servicios HSDPA y UMTS *Release* 99 en la misma portadora, efectuando un reparto de potencia (códigos OVSF) entre ambos. Esta estrategia es la más habitual en los despliegues iniciales de HSDPA. Así, por ejemplo, muchos operadores han comenzado reservando en sus Nodos-B cinco códigos para HSDPA, con lo que el caudal máximo disponible es de 3,6 Mbit/s (a pesar de que la categoría del terminal permita soportar velocidades nominales mayores).

Los terminales HSDPA actualmente disponibles soportan velocidades de 1,8 Mbit/s (Cat. 12), 3,6 Mbit/s (Cat. 6) ó 7,2 kbit/s (Cat. 8). Es importante señalar que estas velocidades son a nivel físico, siendo el caudal a nivel de aplicación sensiblemente inferior debido a la sobrecarga de cabeceras y las eventuales retransmisiones. A ello ha de sumarse el hecho de utilizar un canal común de bajada que se comparte entre los usuarios de la célula. Por dar una cifra indicativa, considerando situaciones prácticas de operación, con codificación entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$, y con 5 códigos en paralelo, se obtienen velocidades promedio a nivel de aplicación entre 1 y 2 Mbit/s.

En la Figura 103 se muestra un ejemplo de los caudales medios obtenidos sobre una red HSDPA real con un terminal Cat. 12 (3,6 Mbit/s) bajo distintos niveles de cobertura. El soporte de velocidades nominales de 7,2 Mbit/s o superiores (categorías 7 a 10) exige por parte de los operadores la inversión en nuevos recursos radio. Así, por ejemplo, para alcanzar los 7,2 Mbit/s de un terminal categoría 8 es necesario que la célula disponga de 10 códigos para HSDPA.

Para ampliar la capacidad HSDPA de un Nodo-B, se puede recurrir a la funcionalidad DCA (*Dynamic Channel Allocation*), que permite variar dinámicamente el número de códigos asignados a HSDPA y a servicios UMTS *Release* 99. Esta estrategia es adecuada para emplazamientos con tráfico reducido. Para emplazamientos con tráficos mayores, la solución es el empleo de una nueva portadora para HSDPA.

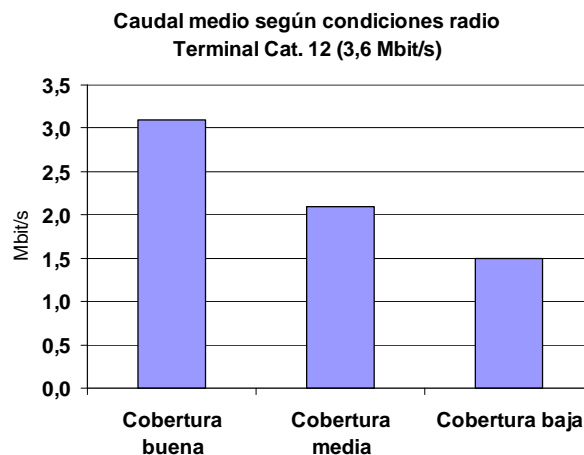


Figura 103. Caudal medio HSDPA según cobertura radio

La introducción de HSDPA en las redes UMTS se ha visto acompañada también de un incremento del caudal de subida, con canales dedicados entre 64 kbit/s y 384 kbit/s. Como se ha indicado en el apartado 2.7.3.2.2, el caudal máximo de subida se amplía aún más con HSUPA. Esta tecnología soporta velocidades teóricas de hasta 5,76 Mbit/s, si bien en la actualidad los caudales máximos que se obtiene están en torno a 1 Mbit/s.

En la Tabla 45 se resumen los caudales máximos proporcionados por las distintas tecnologías de comunicaciones móviles.

Tabla 45. Caudales máximos de tecnologías móviles

	Caudales teóricos		Caudales prácticos	
	Bajada	Subida	Bajada	Subida
GSM	9600 kbit/s	9600 kbit/s	9600 kbit/s	9600 kbit/s
GPRS	171 kbit/s	171 kbit/s	50 kbit/s	10 kbit/s
UMTS Rel. 99	2048 kbit/s	384 kbit/s	384 kbit/s	64 kbit/s
HSDPA	14,4 Mbit/s	384 kbit/s	2-3 Mbit/s	64-384 kbit/s
HSDPA+ HSUPA	14,4 Mbit/s	5,7 Mbit/s	2-3 Mbit/s	1-2 Mbit/s
HSPA+	28 Mbit/s	5,76 Mbit/s	10 Mbit/s *	7 Mbit/s *
LTE	100 Mbit/s	50 Mbit/s	30 Mbit/s *	15 Mbit/s *

* Estimado

En la tabla se indican tanto los caudales máximos teóricos definidos en los estándares como los que cabe esperar en la práctica con terminales reales e

implantaciones de red comerciales. En la tabla se incluyen también estimaciones de los caudales que se podrán obtener en el futuro con las tecnologías HSDPA+ y LTE.

Otro aspecto clave al considerar las prestaciones de los sistemas de comunicaciones móviles es la latencia, parámetro de gran importancia al considerar aplicaciones de tiempo real (por ejemplo, voz y vídeo) o de tipo interactivo (por ejemplo, juegos en red). En la Figura 104 se muestra el retardo de ida y vuelta proporcionado por las distintas tecnologías 3GPP. Se observa una disminución considerable con cada nueva tecnología.

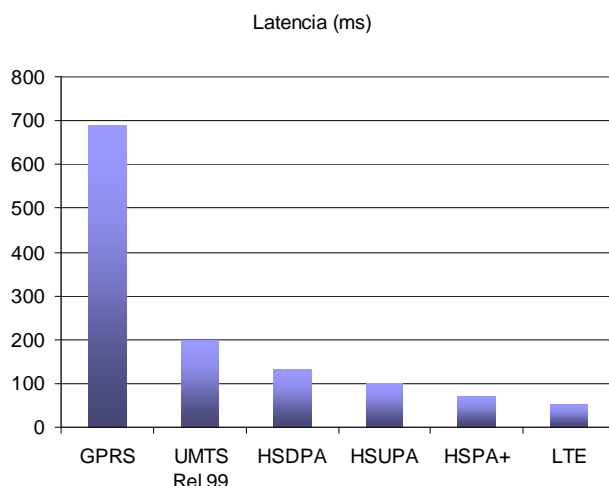


Figura 104. Retardo de ida y vuelta para distintas tecnologías móviles

2.7.6 Adecuación a los servicios considerados

A continuación se indica la adecuación de las redes UMTS/3GPP para el soporte de los servicios de interés en el presente estudio:

- **Telefonía:** Se trata de uno de los servicios básicos esenciales del sistema UMTS. La telefonía en UMTS introduce además una serie de mejoras de calidad y de eficiencia con respecto a GSM. En cualquier caso, ha de tenerse en cuenta que dicha calidad suele ser ligeramente inferior a las de las redes telefónicas fijas (RTB o RDSI) debido a las limitaciones del medio radio. El soporte de VoIP está contemplado dentro de los servicios del Subsistema IP Multimedia (IMS). Esta funcionalidad, prevista en la *Release 5* del 3GPP, aún no está soportada por los operadores, si bien se prevé su implantación a corto plazo.
- **Acceso a Internet:** El acceso móvil a Internet es precisamente uno de los servicios estrella ofrecidos en las redes UMTS. La tecnología HSDPA puede proporcionar prestaciones similares a las de un acceso ADSL básico (1-3 Mbit/s). No obstante, las prestaciones pueden ser muy variables en función de la carga de tráfico de la célula considerada, en la cual influye el número de usuarios simultáneos y el uso más o menos intensivo que éstos hagan de

la red. No obstante, cabe esperar que estas prestaciones mejoren sensiblemente con la introducción de las tecnologías HSPA+ y LTE.

El servicio de *Videostreaming* está normalizado en la *Release 4*, bajo el nombre PSS (*Packet-Switched Streaming Service*). En principio, los sistemas UMTS/3GPP son adecuados para el soporte de este tipo de servicios, cuyos requisitos de retardo son más relajados que los de la videotelefonía, siempre y cuando el número de usuarios no sea muy elevado. En caso de considerar su uso masivo, se hace imprescindible recurrir a técnicas de multicast a fin de evitar la existencia de múltiples flujos simultáneos de audio y vídeo en la red. Este es precisamente uno de los objetivos del servicio MBMS (*Multimedia Broadcast/Multicast Service*), definido dentro de la *Release 6* del 3GPP.

El soporte de **juegos en red** con alta interactividad es también factible gracias a la notable disminución de latencia conseguida por las tecnologías HSPA.

Las tecnologías HSPA son adecuadas para las aplicaciones de **descarga p2p**, si bien el elevado consumo de recursos que requieren (tanto en sentido ascendente como descendente) plantea problemas de escalabilidad a los operadores. Esto ha llevado a la mayoría de los operadores HSPA a introducir mecanismos para regular el volumen de tráfico descargado por los usuarios.

- **Distribución de TV.** Para poder ofrecer una calidad similar a la de la TV estándar (para visualización en aparatos de TV en hogares) se requiere una tasa de bit entre 2 y 5 Mbit/s por canal. La oferta de un número atractivo de canales requeriría una capacidad muy elevada en comparación con el espectro UMTS disponible por los operadores. En consecuencia, estas tecnologías no son adecuadas para la distribución de TV estándar. Las tecnologías UMTS/3GPP sí son adecuadas para TV en terminales de mano, siendo precisamente uno de los objetivos del servicio MBMS definidos en la *Release 6*. En este contexto, existen además otras alternativas para llevar TV a los móviles (por ejemplo, DVB-H).

2.7.7 Aspectos regulatorios

En España se han concedido (O.M. 4811/2000 del Ministerio de Fomento de 10/3/2000) cuatro licencias individuales de tipo B2 para el establecimiento de la red de telecomunicaciones necesaria y para la explotación del servicio de comunicaciones móviles de tercera generación UMTS. Con una vigencia por 20 años, las licencias fueron otorgadas a los operadores Xfera (Yoigo), Vodafone, Telefónica Móviles (Movistar) y Retevisión Móviles (actualmente France Telecom España, operando bajo el nombre comercial Orange).

El coste de las licencias UMTS en España fue de 130,72 millones de euros por operador. A ello han de sumarse los aproximadamente 8.000 millones de euros que cada operador se comprometió a invertir para la puesta en marcha el servicio, y la tasa anual establecida por la Administración por el uso del espectro radioeléctrico. El coste inicial de la tasa para el conjunto de operadores de telefonía móvil se

estableció en unos 961 millones de euros. Tras la polémica suscitada por parte de los operadores, que veían dicha tasa excesiva, en 2002 la Administración decidió rebajar a 360 millones de euros la tasa anual.

En el caso de Europa, el organismo CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) ha establecido el reparto [146] del espectro UMTS para cada modo de operación. El criterio de asignación adoptado, representado en la Figura 105, puede resumirse de la siguiente manera:

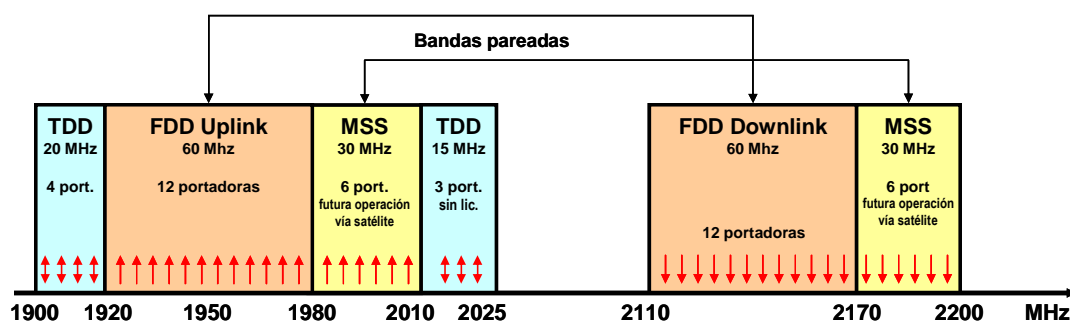


Figura 105. Distribución del espectro en Europa para operación FDD/TDD

- Para la operación FDD han sido asignadas dos bandas pareadas de 60 MHz (1920-1980 MHz para sentido ascendente y 2110-2170 MHz para sentido descendente), lo que supone un total de 12 pares de portadoras de 5 MHz.
- Para la operación TDD en Europa se han asignado dos bandas que en total suman 25 MHz (1900-1920 y 2020-2025 MHz), lo que supone un total de 5 portadoras de 5 MHz (existen 10 MHz adicionales en la banda 2010-2020 MHz que están reservados para operación TDD sin licencia).

Nótese que el número de portadoras disponibles para el servicio UMTS es reducido: 12 pares de portadoras para FDD y 5 portadoras para TDD. Teniendo en cuenta que en un país pueden asignarse varias licencias UMTS, el número de portadoras a disposición de un operador será aún menor. Por ejemplo, en el caso de España se han concedido a cada uno de los cuatro operadores con licencia tres pares de portadoras para FDD y una portadora para TDD. La disponibilidad de portadoras tiene implicaciones importantes de escalabilidad, tal como se discute en el siguiente apartado.

Cabe señalar también la reciente aparición en el mercado de la telefonía móvil de los OMV (Operadores Móviles Virtuales). Se trata de operadores sin red de acceso propia, que prestan servicios de telefonía móvil mediante acuerdo con un operador móvil de red (OMR). Las licencias de OMV en España están reguladas por la CMT en la O.M. CTE/601/2002 [3], contemplándose varias categorías en función del tipo de infraestructura desplegada y el grado de dependencia con el OMR:

- **Revendedor de servicios:** con responsabilidades exclusivamente centradas en la distribución y venta del servicio de telefonía móvil.

- **Proveedor de servicios:** además de las responsabilidades de revendedor de servicios, asume los procesos de facturación, atención al cliente y gestión de SIMs (*Subscriber Identity Modules*) propios.
- **Operador móvil virtual completo:** además de las responsabilidades de proveedor de servicios, dispone de red de conmutación y rangos de numeración propios.

Como se muestra en la Tabla 46, en 2008 existían en el mercado español una veintena de OMVs prestando servicios de telefonía móvil través de las distintas modalidades de servicio establecidas.

Tabla 46: Operadores Móviles Virtuales y Proveedores de Servicios

Operadores móviles con red radio (OMR)					
	Telefónica	Vodafone	Orange		Yoigo
Operadores móviles virtuales completos (OMV)	ONO io	BT Móvil	Jazztel	KPN: Simyo	
		Euskaltel / Viva Mobile			
		R móvil			
		TeleCable Móvil			
Proveedores de servicios	Sweno	Eroski Móvil	Carrefour Móvil	Blau	
		Hits Mobile	Diamovil	Bankinter	
		Lebara Mobile	Cable Móvil / Happy Cable	Euphony / Talkout	
		Pepephone	MásMovil	Hong da Mobile	
			vuelingmovil	XL Móvil	

2.7.8 Escalabilidad

La estructura celular de las redes UMTS permite la consideración de distintos tamaños de célula y niveles de servicio (tasa de bit máxima ofrecida a los usuarios). Así, en base a los diferentes ámbitos de cobertura a considerar (rural, urbano, interiores), en UMTS se pueden utilizar macrocélulas, microcélulas, picocélulas y femtocélulas. En la Figura 106 se indica el alcance y caudales objetivos típicos para cada tipo de célula. En el despliegue inicial de las redes UMTS, los operadores centraron el esfuerzo en cubrir los principales núcleos de población mediante una estructura básica de células de tipo macro para cobertura de exteriores y células micro para cobertura de interiores, con un único par de portadoras en modo FDD.

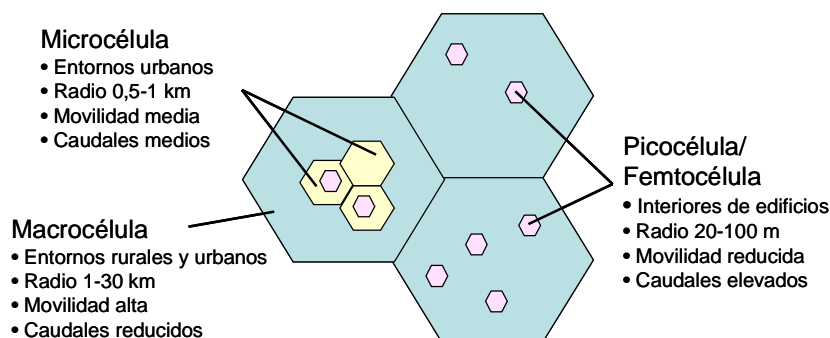


Figura 106. Estructura celular jerárquica

A medida que la demanda de tráfico aumenta, ya sea por un mayor número de usuarios o por aplicaciones que requieren mayores tasas de bit, es necesario ampliar la capacidad de las redes UMTS. Para ello cabe recurrir al empleo de más portadoras, a las técnicas de sectorización y a la introducción de nuevas estaciones base. Todas estas soluciones, sin embargo, presentan limitaciones. Para ampliar la capacidad en zonas altamente pobladas, los sistemas celulares suelen recurrir a las técnicas de sectorización, que permiten una mayor reutilización de las frecuencias, manteniendo controladas las interferencias. Así, en entornos urbanos la gran mayoría de operadores UMTS han desplegado Nodos-B trisectoriales. En zonas densamente pobladas, como por ejemplo en algunas ciudades de Japón, se han utilizado también emplazamientos con 6 sectores.

Otras alternativas para ampliar la capacidad de un Nodo-B es introducir nuevos emplazamientos o incrementar el número de portadoras WCDMA en los ya existentes. Este tipo de soluciones es justificable en entornos donde se prevea una densidad de tráfico elevada (zonas urbanas altamente pobladas, centros comerciales, parques empresariales, aeropuertos). En todo caso, estas son las soluciones a las que se están viendo obligados los operadores para satisfacer la creciente demanda de servicios HSDPA.

Respecto a la introducción de nuevos emplazamientos la situación actual es complicada debido al rechazo social a la instalación de antenas. Esto ha obligado a los operadores a llegar a acuerdos de compartición de emplazamientos para poder ampliar la cobertura de la red 3G, que además se ve perjudicada por el uso de la banda de frecuencia de 2 GHz, con peores características de propagación que la banda de 900 MHz utilizada en el sistema GSM.

En cuanto al empleo de más portadoras en un Nodo-B, la solución viene limitada por la disponibilidad de espectro por parte de los operadores. Como se ha indicado, en España cada operador UMTS dispone de tres pares de portadoras para FDD y una portadora para TDD. Dicha asignación cubre la mayor parte del espectro disponible para sistemas de tercera generación en Europa, por lo que prácticamente no queda hueco para nuevas licencias en nuestro país. No obstante, en la actualidad se está considerando a nivel mundial la posibilidad de habilitar nuevas bandas (por ejemplo, la banda de 2,5 MHz) y la reconversión de otras bandas, como las asignadas actualmente a sistemas 2G. En algunos países europeos ya se ha

comenzado a utilizar para UMTS la banda de 900 MHz actualmente asignada a GSM. En España la Administración ha abierto un periodo de consultas con los operadores para analizar este tema.

En la actualidad, la cobertura de los sistemas 3G es mucho menor que la de los sistemas 2G, habiéndose centrado los operadores fundamentalmente en dar servicio a grandes poblaciones. La extensión de cobertura 3G hacia poblaciones pequeñas y zonas rurales se ve frenada por la importancia de las inversiones necesarias para lograrla. En este sentido, la reconversión de la banda de 900 MHz de GSM para el sistema UMTS se considera una alternativa para mejorar la cobertura 3G con un menor número de emplazamientos. Otra opción que actualmente contemplan los operadores para ahorrar costes al ampliar la cobertura es la compartición de la infraestructura de acceso (*UTRAN Sharing*). En nuestro país, Vodafone y Orange comenzaron a trabajar de esta forma en 2008 para dar cobertura en ciudades de menos de 25.000 habitantes

Otra alternativa más reciente para ampliar la capacidad de los sistemas 3GPP, incluso a zonas donde no existan planes de despliegue de red celular, es el empleo de femtocélulas. Se trata de un refinamiento del concepto de picocélula, proporcionando cobertura dentro de edificios pero a escala de un hogar individual. La solución requiere la instalación en casa del cliente de una estación base HNB (*Home Node-B*) con conectividad IP a la red del operador mediante un acceso fijo (por ejemplo, mediante cable o línea DSL), tal como se muestra en la Figura 107. El soporte de femtocélulas forma parte de las nuevas funcionalidades de la *Release 8* del 3GPP. En conclusión, se puede afirmar que la capacidad de crecimiento de las redes UMTS es moderada. Permite extender la cobertura conforme se despliega el servicio y, una vez desplegado, ampliar la capacidad en zonas reducidas (microcélulas, picocélulas) con demandas de tráfico superiores a la media. Las limitaciones de espectro y el coste económico asociado al despliegue de la infraestructura radio no son adecuados, sin embargo, a escenarios de crecimiento a mayor escala. El empleo de femtocélulas se ve como una alternativa factible para ampliar la cobertura de los sistemas UMTS/3GPP.

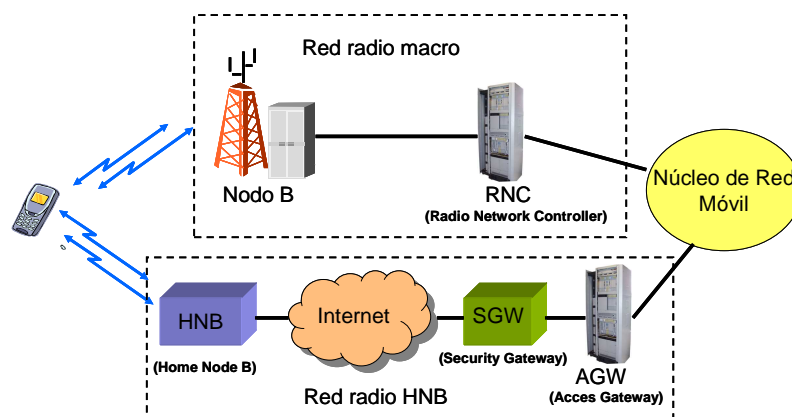


Figura 107. Femtocélulas UMTS/3GPP

2.7.9 Consideraciones medioambientales, meteorológicas y geográficas

Los niveles de radiación electromagnética están limitados por el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre [38] y otras normas descritas en la sección 2.4.9.1. En el caso particular de los sistemas móviles celulares, los límites que se establecen se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Límites de radiación de sistemas móviles celulares en Europa

Sistema	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m^2)
GSM 900	41,25	0,11	4,5
GSM 1800	58,33	0,16	9
UMTS	61	0,16	10

En la Figura 108 se representa la relación entre los valores máximos y típicos de radiación de estaciones de telefonía móvil y los límites que establecen las normativas europeas y españolas. También se muestran valores para los que se han observado y confirmado efectos nocivos para la salud.

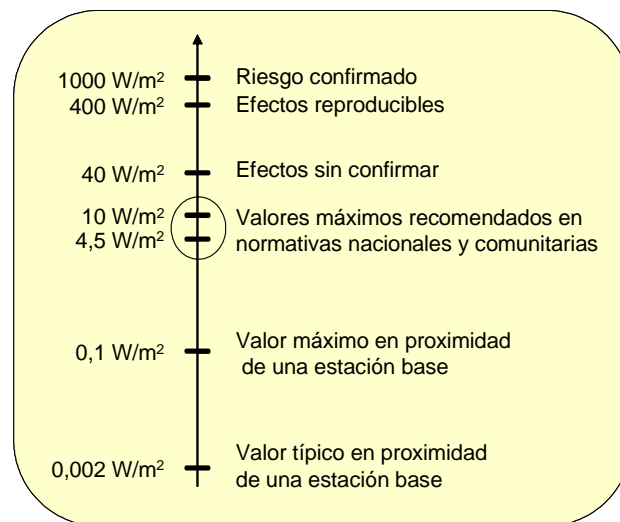


Figura 108. Niveles de radiación de sistemas de telefonía móvil

Por lo que a la incidencia meteorológica en UMTS respecta, no existen problemas reseñables. Dentro de la banda de operación de este sistema (en torno a 2 GHz), los niveles de atenuación debidos a gases atmosféricos, lluvia y otros son relativamente pequeños.

3 CONVERGENCIA DE REDES

3.1 El concepto de convergencia

El título del apartado trata de acotar el alcance del mismo, ya que la palabra “convergencia” se utiliza con múltiples fines y en diferentes ámbitos, lo que a veces introduce confusión. Por ejemplo, el término “convergencia de servicios” se utiliza en muchas ocasiones para referirse al empaquetamiento de servicios por un único agente, con el objetivo principal de ofrecer una factura única. En el caso extremo, el “operador” de servicios ofertante puede no operar ninguna red y utilizar las de otros operadores.

Un paso adicional lo constituirían servicios que surgen como una concatenación de redes, por ejemplo una tele-votación que combina una emisión de TV y una recogida de votos o mensajes desde teléfonos fijos, móviles y correo electrónico, y cuyos resultados o textos se presentan de forma automática en la pantalla.

Un poco más elaborado tecnológicamente es la coordinación de servicios que se prestan desde diversas redes, pero que forman un conjunto, como puede ser el establecer un canal de retorno vía telefónica o ADSL en un sistema de vídeo bajo demanda de TV por cable o satélite.

Este capítulo se centra en la convergencia de redes, cuyo objetivo consiste en que con una única red se puedan ofertar todos los servicios de telecomunicación y de valor añadido que demanden los usuarios. Éste es un objetivo que ha sido tradicionalmente perseguido por los operadores, principalmente los dominantes, que en el transcurso del tiempo han llegado a situaciones de múltiples redes operadas de forma totalmente aislada, apenas interconectadas y respondiendo cada una de ellas a un tipo de servicio. A modo de ejemplo un operador podría encontrarse con las siguientes redes en distintas etapas de su ciclo de vida:

- La Red Telefónica Básica
- Las redes móviles: analógica, GSM, UMTS
- Red de Circuitos Alquilados
- Red X.25
- Red de Circuitos Virtuales ATM
- Red IP de negocios
- Red ADSL-ATM
- Red IP-ADSL-IPTV

...

Cada una de estas redes tiene sus propios elementos de red, su propia gestión de red y su propio modelo de negocio, todo lo cual multiplica los gastos de operación y mantenimiento, haciendo que el funcionamiento de la operadora sea ineficiente, amén de un solapamiento de oferta de funciones a los usuarios que puede crear confusión. Por ello la tendencia a la convergencia de redes es mucho más que un eslogan.

En la Figura 109 se muestra un modelo conceptual de red.

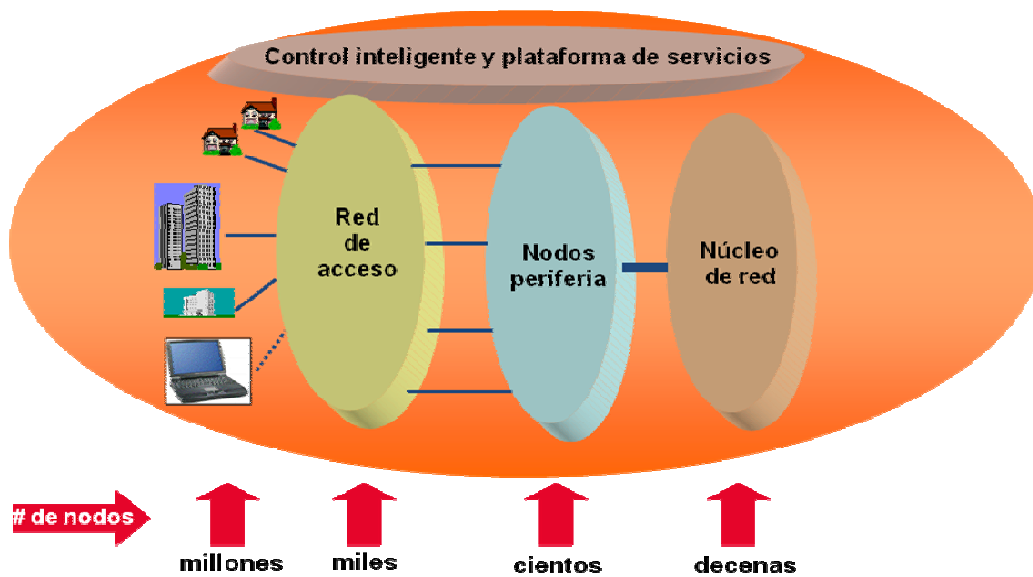


Figura 109. Modelo conceptual de red de telecomunicaciones

Con este simple modelo se desea destacar algunos aspectos importantes a la hora de presentar el concepto de convergencia:

- La división estructural de las redes en:
 - Usuarios: con diversos requisitos de servicios y características de tráfico, y multitud de terminales diferentes.
 - La red de acceso: mecanismo por el que se unen los terminales de los usuarios a los nodos de periferia. La red de acceso utiliza distintos medios de transporte: guiados sobre pares de cobre, coaxial o fibra; inalámbricos como radio u óptica en espacio abierto.
 - Los nodos de periferia: son nodos que convierten los distintos protocolos de acceso en un protocolo uniforme dentro del núcleo de la red.
 - El núcleo de la red: mecanismos de transporte y encaminamiento que interconectan entre sí todos los nodos de periferia.

- Control inteligente y plataforma de servicios: es la inteligencia de la red, que en cooperación con los terminales de usuario y utilizando el transporte de la información proporcionado por las estructuras anteriores, proporciona los servicios de interconexión entre usuarios y de éstos con servicios de valor añadido. En esta estructura se engloban también todas las funciones de gestión de red y servicios que pueden resumirse en las clásicas FCAPS (*Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security*): gestión de fallos, de configuración, de tarificación, de prestaciones y de seguridad.
- También conviene resaltar la cantidad de nodos de red de cada una de las estructuras presentadas, que van desde los millones de usuarios, los miles de nodos de acceso, cientos de nodos de periferia y decenas de nodos de núcleo.
- Una consideración adicional sobre el modelo expuesto, no expresada de forma explícita en la Figura 109, es que según se procede de izquierda a derecha se produce una agregación mayor del tráfico de usuario, de manera que los enlaces entre nodos van siendo de mayor capacidad. Además la distancia geográfica entre nodos también va aumentando.
- El dimensionamiento de la estructura de control no depende de la cantidad de información que se transporta, sino de la cantidad de usuarios -y de nodos, aunque los órdenes de magnitud son muy distintos- lo que se traduce en necesidades de almacenamiento de datos; y en función de la cantidad de eventos que estos usuarios y nodos produzcan se dimensiona la capacidad de procesamiento de la estructura de control.

En la Tabla 48 se muestra la aplicación de este modelo a redes establecidas. Este modelo será empleado a lo largo de este capítulo para explicar las razones y pasos que se han dado en el camino de la convergencia de redes.

3.2 Fases de la convergencia

- La prehistoria: Red Digital Integrada (finales de los 60, principios de los 70). La primera idea de “converger redes” se refería más que a converger redes que prestaban distintos servicios -de hecho aún no habían proliferado, y las principales, telefonía y télex, pertenecían a operadores distintos- a la integración tecnológica de la Transmisión y la Conmutación, ya que ambas tecnologías, separadas durante los inicios en electrónica y electromecánica, estaban convergiendo con la aparición del PCM y la electrónica digital. Las centrales de conmutación se dedicarían a conmutar los canales digitales de las tramas PCM a otra trama (conmutación espacial) y en otro *slot* temporal (conmutación temporal). El resultado era que un conmutador sólo tenía entradas de enlaces PCM de 30+2 canales, que era precisamente lo que transmitían los sistemas de transmisión digitales.

Tabla 48. Correspondencia entre nodos de diferentes redes y el modelo de red

Estructura modelo	Nodos RTB	Nodos red GSM	Nodos acceso Internet
Usuarios	Teléfonos analógicos y RDSI, Faxes analógicos y RDSI, datáfonos, ... 16 millones	Teléfonos móviles, módems, terminales de seguridad, ... ~50 millones	PCs, Puntos de Venta, ... ~8,5 millones (incluye cable)
Nodos de Acceso	Centrales locales, Unidades Remotas de abonado, DLCs, FITL, ... 16.500	Estaciones Base, Estaciones controladoras de estaciones base 71.000 (45.176 GSM + 22.874 UMTS) 1054 Controladores de estaciones base	DSLAM ~6.000
Nodos de Periferia	Centrales de demarcación 215	MSC 353 MSC + 79 HLR	BRAS, Routers de periferia ~1000
Núcleo	Red de transmisión SDH	Red de transmisión SDH	Routers de núcleo y Red de transmisión

Éste es el comienzo de las centrales de conmutación electrónicas digitales, y además comienza la evolución de la red de la única manera que tiene sentido económico: *in-out*, es decir, desde el núcleo hacia la periferia. Las primeras centrales digitales son de tránsito, es decir, no tienen usuarios directamente conectados a ellas. Los usuarios permanecen en el dominio analógico.

- Integración de Servicios. Primer intento: Red Digital de Servicios Integrados de Banda Estrecha (finales de los 70, principios de los 80). Comienza a haber una demanda apreciable para conectarse a ordenadores, satisfecha de forma deficiente mediante módems de banda vocal, o de forma cara mediante circuitos dedicados. La progresiva digitalización de la red lleva a dos desarrollos que tuvieron éxitos diferentes:
 - La definición de interfaces digitales de abonado. Los primeros sistemas DSL suponían un salto importante en la capacidad disponible, que pasaba de unos 9,6 kbit/s de los módems de banda vocal de la época, a los 144 kbit/s de un acceso básico.
 - La señalización entre centrales se digitaliza y se independiza del transporte: es un canal de datos que transporta información para el establecimiento de sesiones y otra información. Se normaliza mediante el sistema de señalización por canal común número 7 del CCITT (SS7).

Puede afirmarse que el éxito de la RDSI ha sido desigual según mercados. Mientras que en EE.UU. es prácticamente inexistente, en Europa obtuvo mejores resultados. Así, Alemania hizo una fuerte política de apoyo a su

despliegue, en Francia existe una red importante, y en España, aunque todas las centrales de conmutación son capaces de soportar RDSI, Telefónica no llegó a impulsar decididamente su comercialización para no “canibalizar” su servicio de circuitos alquilados Ibermic. Lo que sí constituyó un éxito, tanto en RDSI como en telefonía básica, fue el citado sistema de señalización N^o7 entre centrales.

- Integración de Servicios. Segundo intento: Red Digital de Servicios Integrados-Banda Ancha-ATM (finales de los 70, principios de los 80). Sin aún haber tenido éxito en el despliegue de la RDSI de banda estrecha se comienzan los trabajos en la estandarización de la RDSI de banda ancha. Ahora, a la demanda de conexión de terminales a ordenadores y de interconexión de ordenadores, a mayores velocidades, se une por otro lado una presión de los operadores de cable y su negocio de distribución de TV. El intento entonces es proporcionar anchos de banda con capacidad suficiente para proporcionar servicios de TV, particularmente vídeo bajo demanda, y conexiones de datos a alta velocidad. La tecnología de transporte seleccionada fue el ATM, mientras que la arquitectura de control se hereda de la RDSI de banda estrecha, con señalizaciones extendidas SS7-BA. En cuanto a los accesos de usuario se supone un acceso óptico, y consecuentemente el ATM es un sistema de transporte con poca protección a errores, por suponer un medio benigno. Como esta hipótesis es desde un punto de vista económico poco realista, se pasa a los accesos sobre par de cobre, que dan origen a los sistemas ADSL y que siguen un desarrollo propio e independiente de la RDSI-BA. Puede concluirse que la RDSI-BA ha sido un gran fracaso, que ha dejado como principal resultado núcleos de red en tecnología ATM, en la actualidad en fase de sustitución, y los sistemas ADSL y VDSL, que han seguido su desarrollo independiente, pero conservando el transporte ATM, aunque incluso hoy en día mantener este modo de transporte es difícilmente justificable.
- Inteligencia de Red (principios de los 80 hasta hoy). El desarrollo de la Inteligencia de Red en sus diferentes versiones, *Intelligent Network* (IN) en Europa y *Advanced Intelligent Network* (AIN) 1 y 2 en EE.UU., y el intento fracasado de obtener una aproximación única a nivel mundial denominado *Telecommunications Information Networking Architecture* (TINA), tiene como principio subyacente el principio de acoplamiento débil transporte-control. En la Figura 110 se ilustra sucintamente este principio.

El principio del acoplamiento débil es una continuación de la separación tecnológica entre Conmutación y Transmisión, que se reformula en términos de Control y Transporte. La justificación viene dada porque las leyes de la evolución tecnológica que rigen ambos dominios tienen ritmos diferentes, así como las áreas de conocimiento dominantes en cada uno de ellos. Resumiendo de forma un tanto grosera estos aspectos:

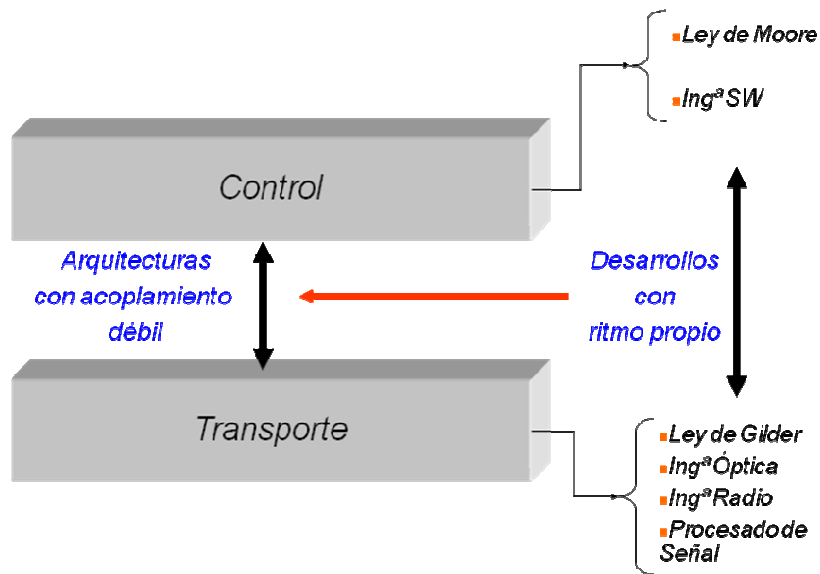


Figura 110. Principio de acoplamiento débil transporte-control

Dominio de Control:

- La ley dominante es la Ley de Moore: La densidad de integración de circuitos se duplica cada 18 meses, a precio constante.
- Área de conocimiento dominante: Ingeniería Software.

Dominio de Transporte:

- La ley dominante es la Ley de Gilder: El ancho de banda crece al menos tres veces más rápido que la potencia de computación. Esto significa que si la potencia de computación se duplica cada 18 meses, la capacidad de comunicación se duplica cada 6.
- Áreas de conocimiento dominantes: Ingeniería Óptica, Ingeniería Radio, Proceso Digital de la Señal.

La Inteligencia de Red es la primera plasmación a gran escala de este principio. Consiste en que la introducción de nuevos servicios se realiza en ordenadores separados de la red telefónica, es decir, fuera de los ordenadores que controlan el funcionamiento de las centrales digitales, e interfundando con éstas a través de un protocolo de transmisión de datos como es el SS7, que emplea enlaces separados del transporte de la información de usuario. Esto da origen a una “componentización” del software, a una composición de componentes de servicio y a lo que se denomina actualmente “ingeniería de servicios”. Aunque en principio esta parte de creación de servicios estaba abierta a nuevos actores exteriores al operador de red, mediante la estandarización de interfaces, en la práctica no ha sucedido así.

- Explosión de la telefonía móvil (década de los 90). La evolución conjunta del Proceso Digital de la Señal, la Ingeniería Radio, el SS7 y la capacidad de proceso y almacenamiento hicieron posible la explosión de la telefonía móvil, con niveles de teledensidad superiores al 100% en países desarrollados (caso español) o alcanzando a nivel mundial en quince años volúmenes superiores a los alcanzados por la telefonía fija en ciento treinta años. El despliegue tan rápido y reciente de esta tecnología hace que se haya beneficiado del estado más actualizado de la tecnología y que, simplificando y resumiendo, puede caracterizarse por:
 - Centrales más potentes y gran capacidad en los nodos de almacenamiento de la información. Eficiente señalización entre centrales (SS7), con un diseño basado en Inteligencia de Red desde el principio. Una consecuencia de todo ello es la reducción del número de centrales (MSC) en un orden de magnitud con respecto a la situación de la red de telefonía fija: 100 frente a 1000 para un país como España.
 - Terminales dotados de mayor inteligencia que, en combinación con la mayor inteligencia de la red (MSC + Inteligencia de Red), hacen que la oferta de servicios sea desde un principio superior a la oferta de la red fija.
- Explosión de las redes IP (principios de los 90 hasta hoy). En paralelo con la evolución anteriormente descrita –originada en el campo de las redes públicas y operadores tradicionales, “las telefónicas del mundo”, “la escuela de los *bellheads*” [147]- se produce la evolución de las redes de comunicación entre ordenadores, con un crecimiento exponencial de usuarios a partir de la creación de la Web y los navegadores, que conceptualmente suponen una innovación que va un poco más allá de una buena interfaz de usuario. Esta red que se soporta sobre el transporte de las redes públicas, crea unos nodos de encaminamiento –los *routers*- más sencillos que las centrales telefónicas y desplaza la inteligencia de los servicios fuera de la red, es decir a los terminales de usuario y a los servidores, utilizando mayoritariamente un esquema cliente-servidor. La evolución de estas redes ha estado liderada por instituciones (universidades, *spin-off* de universidades, grandes empresas,...) ajenas a los operadores tradicionales –es la “escuela de los *netheads*”- lo que ha producido un ambiente de innovación constante, un tanto potenciado por la idea percibida de “gratuidad de la Internet”. El crecimiento exponencial de usuarios ha sido acompañado por un crecimiento incluso mayor del tráfico generado por los mismos, pasando de mensajes de correo o páginas Web textuales a multimedia, media *streaming*, *peer to peer*, etc.

Las leyes dominantes en este mundo son las siguientes; la ley de Moore: más potencia y capacidad de almacenamiento en terminales, servidores y *routers*;

La ley de Metcalfe²⁴: el valor de una red es proporcional al cuadrado del número de sus usuarios; y la ley del Telecosmos –debida también a Gilder–: el valor de una red crece con el cuadrado de la potencia de los terminales conectados a la misma. Un paso importante es cuando la Internet empieza a ofrecer servicios alternativos a los ofrecidos por las redes públicas tradicionales, siendo el caso de más impacto, mediados los 90, el de la Voz sobre IP (VoIP) a “precio Internet”, precio que se percibe como gratuito.

Es importante señalar que la Internet utiliza las redes de acceso y transporte de los operadores públicos. Los crecimientos exponenciales, tanto del número de usuarios como de los volúmenes de tráfico, han forzado a los operadores a realizar ampliaciones de red, que además han tenido que hacer sin unas reglas de dimensionado basadas en estimaciones de perfiles de tráfico conocidos, lo que ha conducido a sobredimensionar las redes. Desde el punto de vista de los operadores públicos, su posición en la cadena de valor es débil, ya que los servicios que añaden valor son proporcionados por actores externos, y la rentabilidad de sus inversiones en el aumento de la capacidad no responde a sus expectativas.

A continuación se presentan las distintas aproximaciones adoptadas para la consecución del objetivo de “Red Única”, agrupadas en función del plazo temporal previsto de implantación.

- Los apartados del 3.3.1 al 3.3.5 son las aproximaciones realizadas, en vías de realización o con previsión de realización a medio plazo, fundamentalmente por los operadores públicos establecidos.
- En el apartado 3.4 se presentan proyectos a largo plazo (10-15 años) que tienen como objetivo una evolución profunda o un cambio radical de la arquitectura Internet, que tendría como resultado final la creación de una nueva red, heredera de la actual Internet, no derivada de las redes públicas actuales, capaz de proporcionar todos los servicios con los mayores niveles de seguridad y calidad, y soportando cualquier modelo de negocio.

3.3 La convergencia a partir de las redes públicas: fijas o móviles.

3.3.1 Convergencia Datos-Telefonía

Permítasenos comenzar este apartado con un hecho que no sabemos lo que puede tener de anecdótico o de verdaderamente significativo, en cualquier caso real. En 1998 Cisco realiza una campaña de marketing en Europa dirigida a los operadores

²⁴ Está basada en el número potencial de conexiones que tiene un usuario de una red de n usuarios que es $n.(n-1)/2$; aunque parece más lógico un aumento del valor más moderado: $n.\log_2(n)$

establecidos de telecomunicación, presentando la VoIP como alternativa a la telefonía clásica con un argumento de extremada simplicidad: “un *router* con la misma capacidad de conmutación que una central convencional cuesta una décima parte del precio”. Poco tiempo después, (¿a consecuencia de esta presentación?) France Telecom suspendía cualquier nuevo pedido de centrales convencionales.

El caso es que a finales de los 90, tanto los operadores como los suministradores, empezaron una carrera hacia la Red IP que soportara tanto “la Internet” con su modelo *Best Effort*, como una telefonía sobre IP (ToIP) con calidad garantizada y soportando los servicios presentes en las centrales, más los de inteligencia de red. Las barreras a esta convergencia “simple” son:

- En el mundo hay más de mil millones de terminales de usuario analógicos. Hay que ubicar rentablemente los conversores a VoIP en la red, ya que no es viable sustituir esta cantidad de terminales
- En segundo lugar, la Red Telefónica Básica es el resultado de más de ciento treinta años de evolución. Esto implica que alrededor del servicio de interconexión de usuarios se han desarrollado los denominados servicios suplementarios, en número de ciento diez en el caso de la RDSI, muchos de ellos disponibles también en telefonía básica, además de los soportados por la Inteligencia de Red. Todos estos servicios hay que migrarlos a alguna plataforma fuera de la central de conmutación.
- Una última consideración es: ¿qué se gana? En principio, una mejor utilización de la red de transporte por compartición entre los servicios de datos y la voz. Y poco más, ya que las potenciales ganancias de ancho de banda por compresión y supresión de silencios en la voz, en realidad no se acaban de materializar si se quiere mantener la calidad de servicio.

En cualquier caso, empezaron los experimentos sobre transmisión de VoIP en el núcleo de red, por ser el punto donde el número de conversores a VoIP es menor y la inteligencia de los conmutadores se reduce a interpretar la señalización SS7 y encaminar sin intervenir de forma importante en el soporte de servicios suplementarios. Esta estrategia acaba desembocando en las Redes de Próxima Generación-Fase 1 que se presentan en el apartado 3.3.3.

3.3.2 Convergencia Fijo-Móvil (¿o Móvil-Fijo?)

Hay una frase que resume el espíritu de esta convergencia: “un fijo es un móvil que se está quieto”. Y de hecho, para ilustrar esta afirmación está el sistema TRAC (Telefonía Rural de Acceso Celular), que ha tenido un amplio despliegue en su versión de telefonía celular analógica (Moviline) y menor en su versión GSM. Las MSC que los soportan tienen además funcionalidad de central de la red fija. El ejemplo del TRAC ilustra una de las barreras a este tipo de convergencia: el equipo TRAC que se ponía en casa del usuario tenía que soportar parte de la funcionalidad de la función BORSCHT²⁵ necesaria para teléfono analógico: alimentación del

²⁵ BORSCHT: *Battery feed, Overvoltage protection, Ringing, Signaling, Coding, Hybrid and Testing*

aparato telefónico, el suministro de corriente de llamada, la supervisión del gancho y los impulsos de disco y algún mecanismo de prueba, ¡todo ello para mantener la funcionalidad del “teléfono negro” de siempre, pero sin poder añadir facilidades disponibles en los aparatos móviles!

No obstante la convergencia fijo-móvil o más bien móvil-fijo es un camino que se exploró –y que en la actualidad se contempla, pero ya con el objetivo de una convergencia total- y consiste básicamente en convertir las MSC en centrales mixtas y sustituir las centrales locales, donde entre otras reside la función BORSCHT, por concentradores de línea con inteligencia mínima.

El problema reside en que para una red fija madura y muy extendida no existe ningún incentivo para este tipo de convergencia.

3.3.3 Redes de Próxima Generación: Fase 1

El desarrollo de lo esbozado en el apartado 3.3.1 conduce al concepto de NGN (*Next Generation Network*), que se origina en el dominio de las redes fijas. Buscando una definición para este título se encuentran:

- Según Telcordia: “NGN es un transporte y conmutación a alta velocidad para voz, fax, datos y vídeo, de forma integrada usando una red basada en paquetes”.
- Según ETSI y UIT-T [148]: “Es un concepto para la definición y despliegue de redes. Con una separación formal entre diferentes capas y planos con interfaces abiertos, que ofrece a los proveedores de servicio una plataforma sobre la que pueden evolucionar paso a paso para crear, desplegar y gestionar servicios innovadores. Sus características principales son:
 - Una arquitectura que desacopla servicios y redes, con múltiples capas y planos (separación clara de funciones de servicio y transporte.
 - Capacidad para la creación, despliegue y gestión de cualquier clase de servicio (conocidos y por venir), usando APIs, combinaciones de cualquier tipo de medio, etc.
 - Las entidades funcionales controlando las políticas, sesiones, medios, recursos, entrega de servicio, seguridad, etc. pueden estar distribuidas sobre la infraestructura, comunicándose a través de interfaces abiertas.
 - Interfuncionamiento con redes actuales mediante pasarelas (*gateways*)
 - Soporte de terminales existentes y *NGN-aware*
 - QoS para servicios en tiempo real es un problema clave que debe ser resuelto
 - Seguridad de la información y contra el uso fraudulento de servicios“

- Según Vinton Cerf:
 - “A cualquiera con una idea sobre redes (transmisión, protocolos, etc.) le gusta pensar que esa idea será la base para la “*next big thing*”. La frase *Next Generation Network* implica de alguna manera una nueva red monolítica que se construye basada en la última idea del proponente. Por supuesto, todos sabemos que la evolución de las redes sucede en medio de una sopa de nuevas ideas, emergiendo de forma poco predecible. Esto nos lleva a que la NGN es un proceso evolutivo, que tal vez estará salpicado de algunas sorpresas (quizá una nueva tecnología)”.

A continuación se presenta en qué se ha traducido a efectos prácticos la NGN-fase 1 en los escasos despliegues de las operadoras.

La evolución hacia una NGN-Fase 1 es a partir de la Red Telefónica Básica y es una estrategia *in-out*, es decir desde el núcleo de la red hacia los usuarios. Las etapas de esta evolución se presentan en la Figura 111.

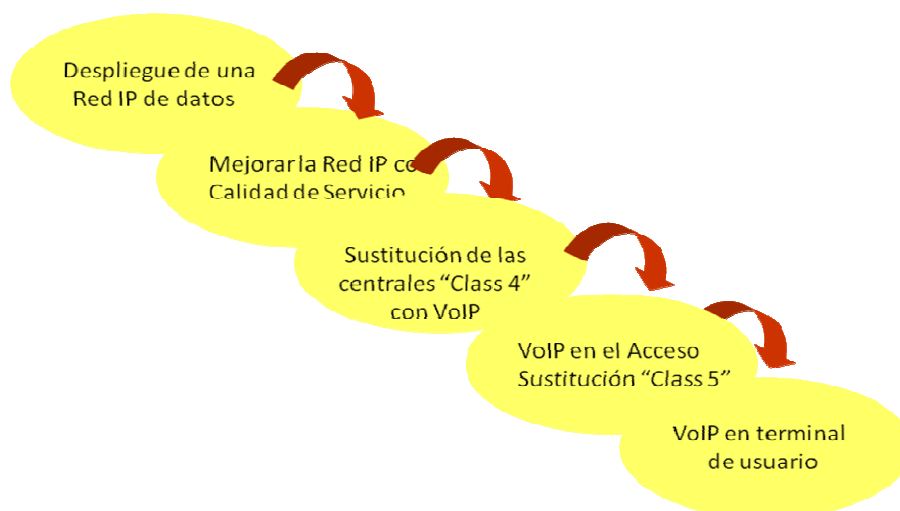


Figura 111. Hoja de ruta de un operador establecido hacia la NGN

La situación de partida es que el operador tenga una red IP que utiliza para datos; a esta red se le dota de mecanismos de Calidad de Servicio para priorizar el tráfico de voz –obsérvese que es una convergencia datos-telefonía-; y a continuación se procede a la sustitución progresiva de las centrales de conmutación de circuitos por pasarelas de VoIP, procediendo desde las centrales de periferia o demarcación (los nodos provinciales) hacia el usuario. En la Figura 112 se muestra la situación de partida -la red actual- con una indicación de cómo ésta se corresponde con el modelo genérico de red.

La Figura 113 muestra el resultado de la primera etapa de la evolución: la sustitución de las centrales de periferia por *routers*, convirtiendo todos los enlaces

que llegaban a ella desde las centrales locales a VoIP en *Trunk Gateways*. La señalización SS7 se envía ahora al elemento de control de la nueva arquitectura que es el *SoftSwitch* que se encarga de realizar la labor de encaminamiento en el dominio IP actuando sobre el *Trunk Gateway* a través del interfaz H.248 estandarizado por la UIT-T. Existe una función no representada en la figura que se encarga de este interfuncionamiento, el *Signalling Gateway*, que se supone localizado en el *SoftSwitch*.

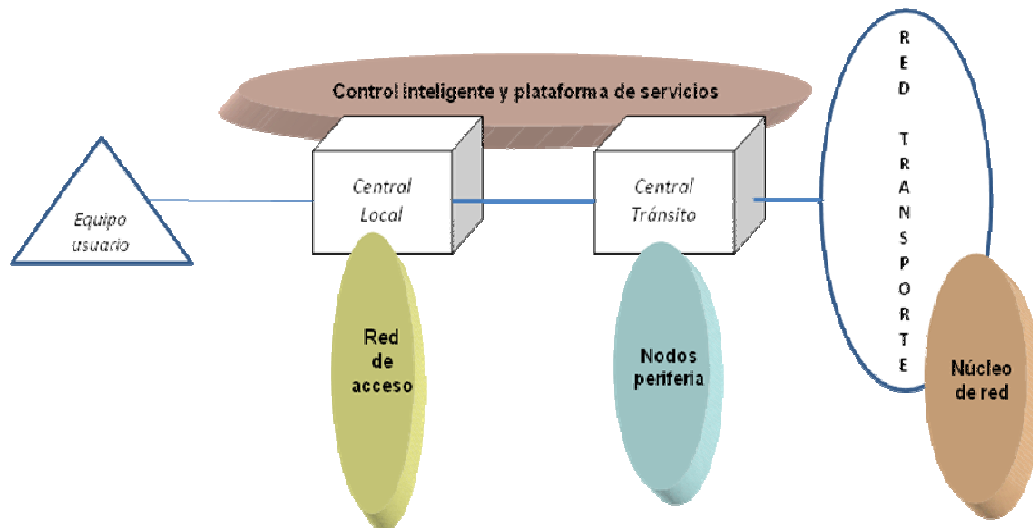


Figura 112. Situación de partida. Red Telefónica Básica

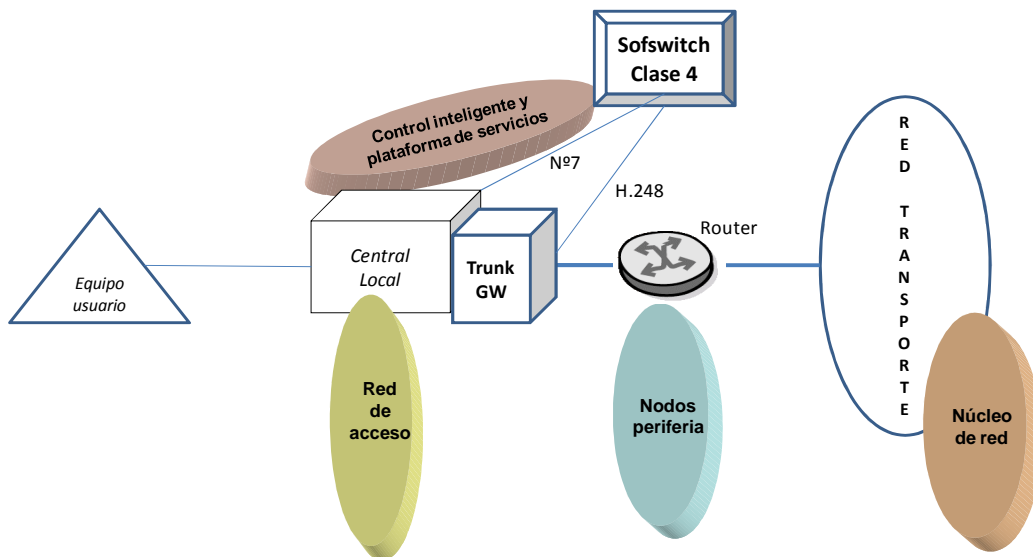


Figura 113. Primera fase. Sustitución de centrales Clase 4

Es de observar que esta etapa de la evolución es relativamente sencilla de efectuar, debido a que la inteligencia de las centrales de tránsito es limitada, ya que apenas

intervienen en el soporte de servicios avanzados. Normalmente esta etapa se conoce como sustitución de centrales Clase 4²⁶. Obsérvese también que los medios de transporte a partir de las centrales locales son compartidos entre datos y voz, y que en la actualidad el volumen del tráfico de datos es superior al de voz, siendo éste precisamente un argumento a favor de esta evolución.

La Figura 114 muestra el siguiente paso de la evolución, en el se sustituyen las centrales locales por *Access Gateways* y el *SoftSwitch* se convierte en un Clase 5, lo que supone un cambio importante, pues en este punto hay que introducir todos los servicios que actualmente proporcionan las centrales locales.

Como hay que seguir proporcionando las funciones BORSCHT hay que colocar los circuitos de línea en una unidad que además concentre tráfico. Este movimiento se puede aprovechar para, simultáneamente, acercar estos concentradores mediante fibra hacia los usuarios, proporcionarles así mayor ancho de banda de datos (los concentradores pueden alojar líneas xDSL), y liberar los edificios de las centrales que, por su ubicación, suelen tener una gran valor inmobiliario.

El paso final sería la sustitución de los equipos en casa de los usuarios por terminales NGN o terminales “clásicos” conectados a una *Residential Gateway*: elemento que convertiría el interfaz del teléfono convencional en una interfaz NGN.

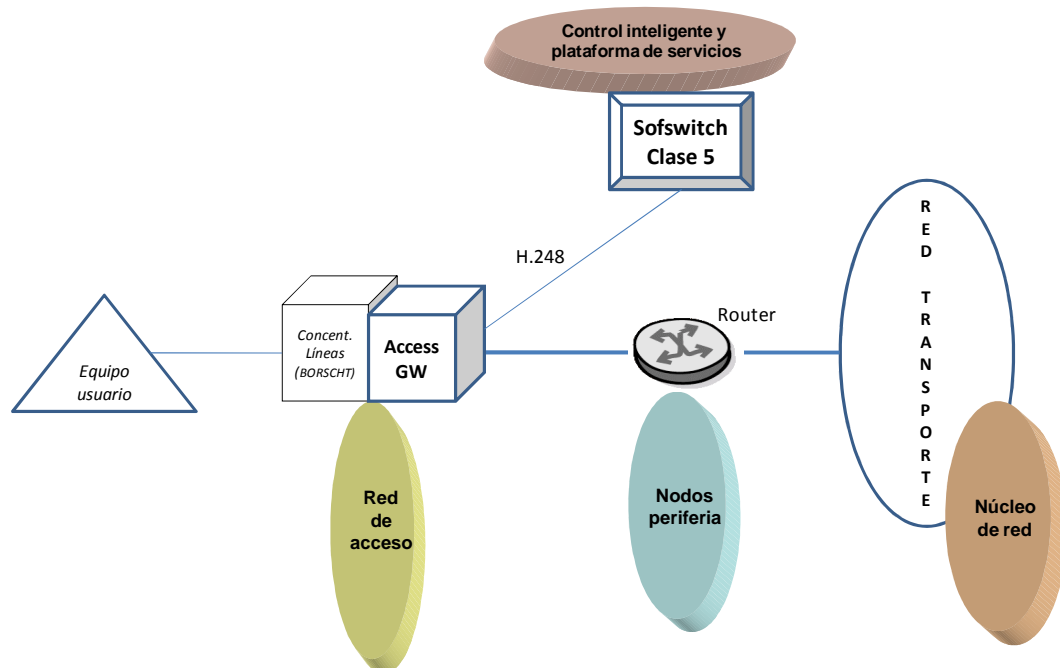


Figura 114. Segunda Fase. Sustitución de centrales Clase 5.

²⁶ Nomenclatura que proviene de la definición del plan de conmutación de UIT-T, que establece una jerarquía de centrales: Clase 1 = internacional; Clase 2 = Nodal; Clase 3 = regional; Clase 4 = provincial; Clase 5 = locales. Las redes modernas son a “dos niveles”: locales y tránsito.

3.3.4 Redes de próxima Generación: Fase 2. IMS

Proveniente del mundo móvil, concretamente del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), surge una nueva arquitectura de control, que comienza a ser especificada en la *Release 5* y alcanza un grado de madurez en la *Release 7*, y es, desde el punto de vista de arquitectura de control, el soporte para el paso de un núcleo de red móvil de circuitos a paquetes, más concretamente a una red IP con calidad de servicio. Esta arquitectura de control es la que se conoce como Subsistema IP Multimedia (IMS). Revisten importancia los lazos establecidos con el mundo Internet a través del IETF y la adopción de protocolos del mundo *nethead*: SIP [141] y DIAMETER [149]. En el mundo de las redes fijas, el grupo TISPAN del ETSI se encarga de definir la versión “convergente” del IMS, es decir, añadir las funciones necesarias para dar soporte a los servicios de las redes fijas.

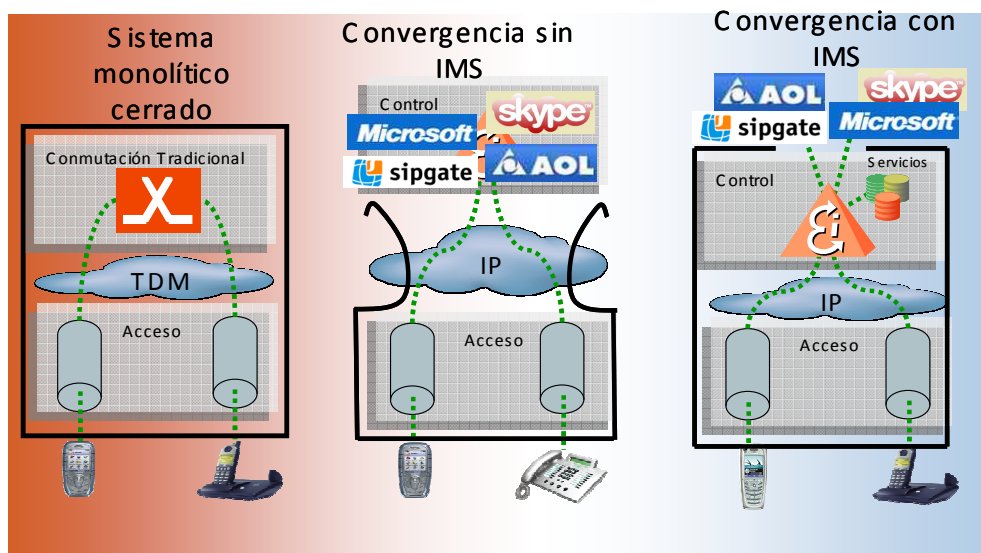
Una definición canónica de IMS podría ser: “IMS es una arquitectura que establece un marco para soportar, controlar y gestionar sesiones de servicios y aplicación sobre una red convergente IP fija o móvil”.

Una visión más crítica establece: “IMS mantiene la visión de los operadores establecidos de telecomunicaciones (*bellheads*) dónde los servicios son proporcionados por la inteligencia de red en vez de por la inteligencia en los terminales y servidores externos”.

Esta crítica se ilustra en la Figura 115. La arquitectura de la izquierda representa la red “clásica y cerrada” de la telefonía tradicional, donde la inteligencia reside en los nodos de red (centrales telefónicas) y en la que sólo aparecen dos actores: el operador de red y el usuario. En la arquitectura central se representa el mundo Internet, con una red IP, la nube, que sólo proporciona conectividad sin valor añadido hacia los proveedores de servicio. La “propuesta IMS” de los operadores de telecomunicaciones es que el acceso a estos servicios exteriores se hace de forma controlada a través de ellos. ¿Y por qué hay que pasar a través del operador de telecomunicaciones?, ¿qué gana el usuario?, ¿qué ganan los proveedores de servicio? Los argumentos de los operadores son:

- De cara al usuario:
 - La red IP está controlada y puede dar calidad de servicio.
 - La posibilidad de una oferta más rica de servicios y aplicaciones.
 - Una definición más rica de perfiles de usuario.
 - Posibilidad de obtener los “mismos servicios” personalizados, independientemente del terminal y acceso utilizados.
 - La red es segura.
- De cara a los proveedores de servicio externos:
 - Gestión de nombres, direcciones y rutas.
 - Soporte a la tarificación.

- Provisión de funciones estándar relacionadas con las comunicaciones y comunes a cualquier servicio (localización, presencia, gestión de grupos).
- Control de acceso de los usuarios al servicio.
- De cara a los proveedores de red:
 - Compartición de datos y funciones entre servicios: eficiencia y facilidad de mantenimiento.
 - Reducción de inversiones y gastos de mantenimiento: infraestructura de control única para toda la red.
 - Rápida creación de nuevos servicios.



Fuente: Siemens

Figura 115. El modelo de negocio del IMS

En la Figura 116 se presenta la arquitectura IMS. Las funciones principales son las de control de sesiones o llamadas, denominadas CSCF (*Call Session Control Function*), que se dividen en tres subfunciones: *Server*, que es la que realmente ejecuta la lógica de la sesión; *Proxy*, que es con la que se pone en contacto en primer lugar el usuario y lo dirige a la *Server* correspondiente; e *Interrogating*, que maneja sesiones con otros dominios IMS. Las tres entidades funcionales a la derecha (BGCF, MGCF, SGW) son funciones de control de las pasarelas de interfuncionamiento con otras redes; y las funciones a la izquierda (NASS y SDPF/A-RACF) son las encargadas de controlar el acceso de usuarios y buscar y aplicar las políticas de calidad de servicio aplicables a cada usuario.

Reviste particular importancia la base de datos maestra del sistema, denominado HSS (*Home Subscriber Server*), que extiende considerablemente los HLR/AuC de los sistemas GSM, pero manteniendo la compatibilidad. En el recuadro "Aplicación" se

encuentran los servidores de aplicaciones, que grosso modo pueden dividirse en dos tipos: los *enablers* o habilitadores, que implementan servicios de uso común por un gran número de servicios y aplicaciones, tales como Presencia, Gestión de Grupos, Localización, Tarificación, etc.; y los específicos de determinadas aplicaciones, que a su vez se pueden dividir en provistos por el operador, por ejemplo un servicio de tele-reunión entre múltiples localizaciones; o por agentes externos, por ejemplo un sistema de atención sanitaria basado en teleasistencia.

Los elementos MRFC y MRFP sirven para la “manipulación de los medios” controlados por el núcleo IMS. Ejemplos de esta manipulación son: puente de multiconferencia, transcodificaciones,...

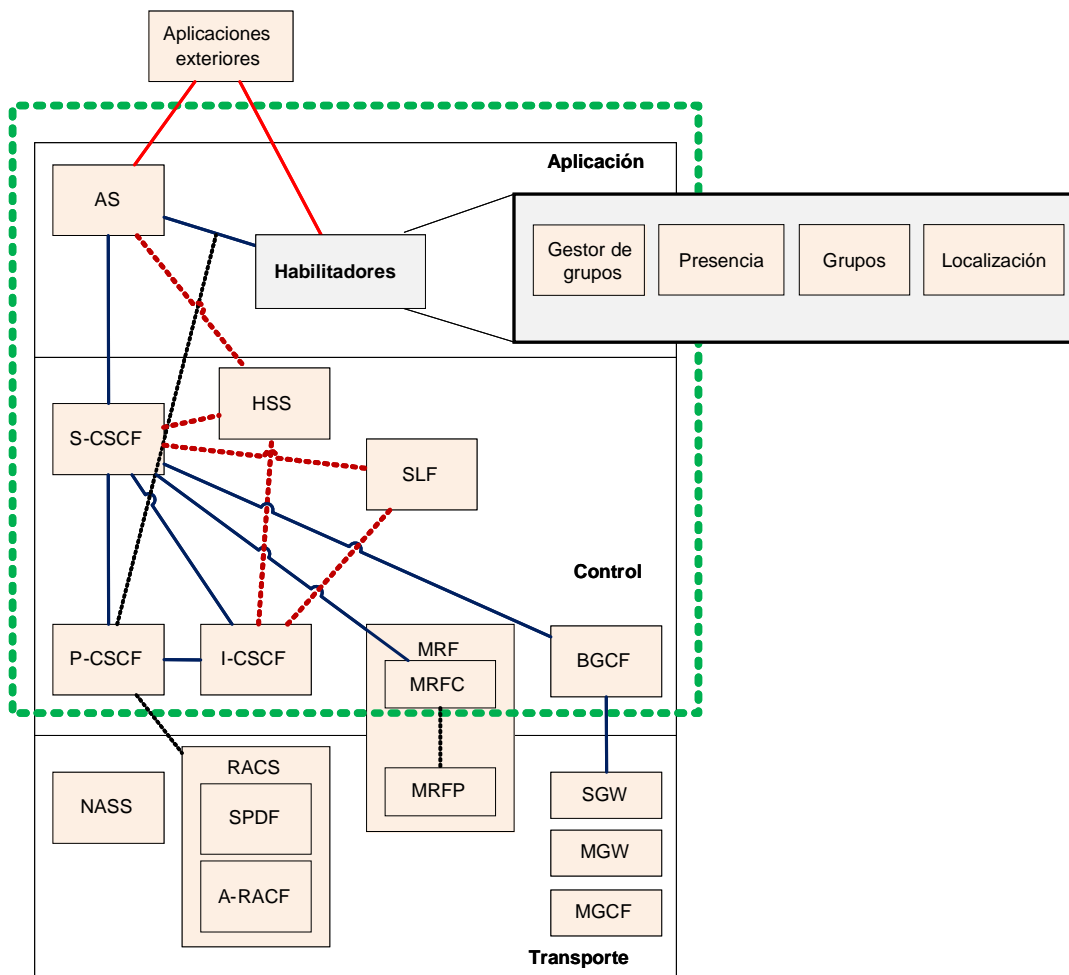


Figura 116. Arquitectura IMS.

Para concluir este apartado, se intenta responder una pregunta recurrente cuando se presenta el IMS: ¿es absolutamente necesario el IMS?

- No. La mayoría, si no todos los servicios, pueden ofrecerse sin IMS.
- Pero:
 - El IMS debe hacer el proceso de despliegue de nuevos servicios más rápido y barato.
 - Debe facilitar la oferta de aplicaciones por parte de terceros.
 - La convergencia Fijo-Móvil se facilita.
- Aunque el despliegue inicial será caro, sobre todo en el período de transición por requerir el despliegue de pasarelas tanto de medios como de señalización.

3.3.5 Convergencia con el audiovisual

Puede considerarse que el último paso en el camino de la convergencia es añadir a la convergencia fijo-móvil y datos-voz, la convergencia con el mundo audiovisual, es decir, que los servicios *quadruple play* (telefonía, Internet y televisión en terminales tanto fijos como móviles) sean soportados por una única red.

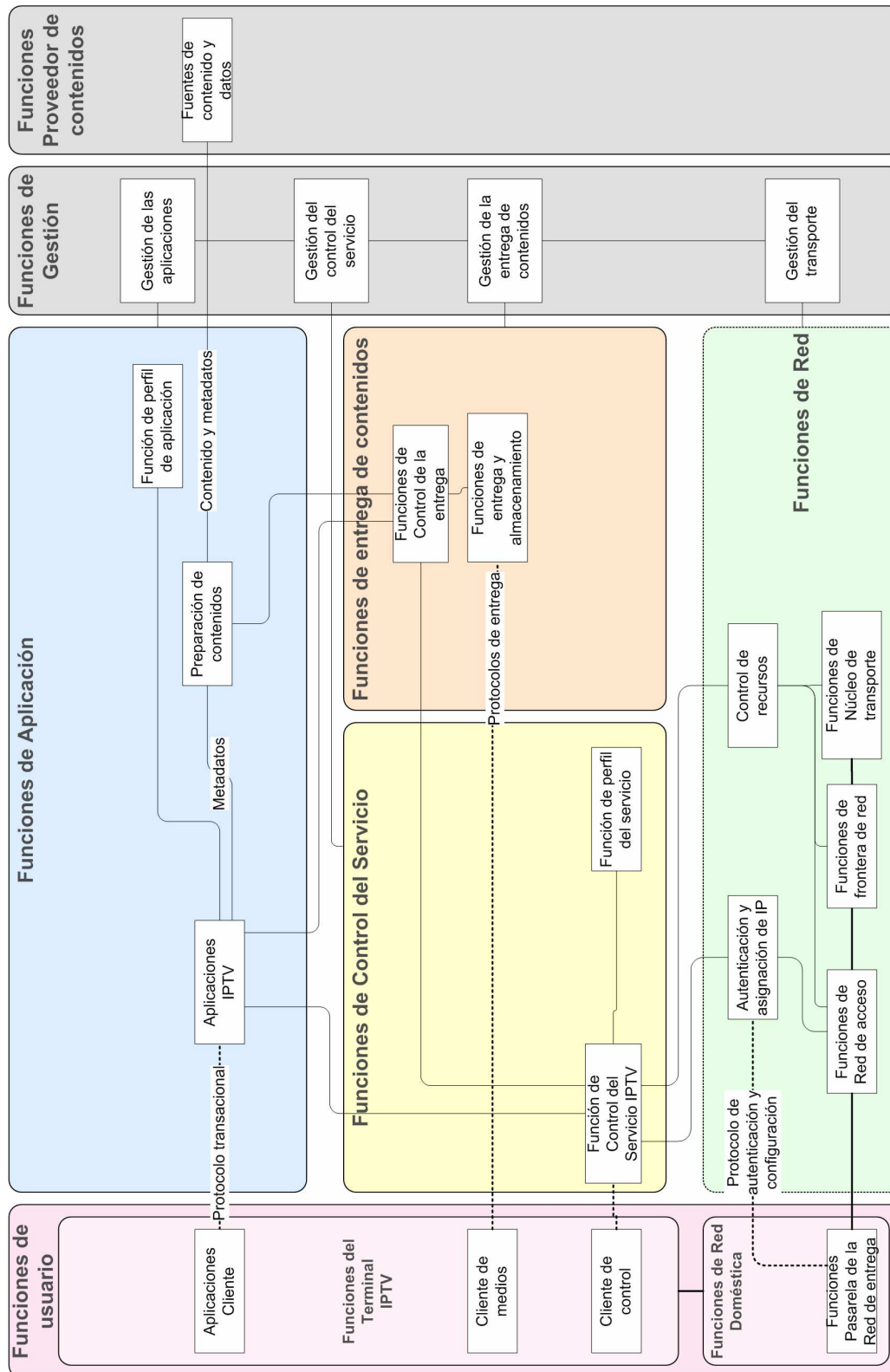
Desde abril de 2006 en el seno de la UIT-T se ha desarrollado una muy intensa actividad en el terreno de la estandarización de la IPTV, primero dentro del *Focus Group* sobre IPTV, que luego pasa su actividad al grupo denominado *Global Standards Initiative*, y que a mediados de 2008 había publicado veintiún entregables.

Para el aspecto que ocupa este capítulo son de relevancia sus trabajos de definición de arquitectura funcional para la implementación de los servicios de IPTV.

Partiendo de una arquitectura funcional marco (ver Figura 117) define tres variantes de implementación de esta arquitectura:

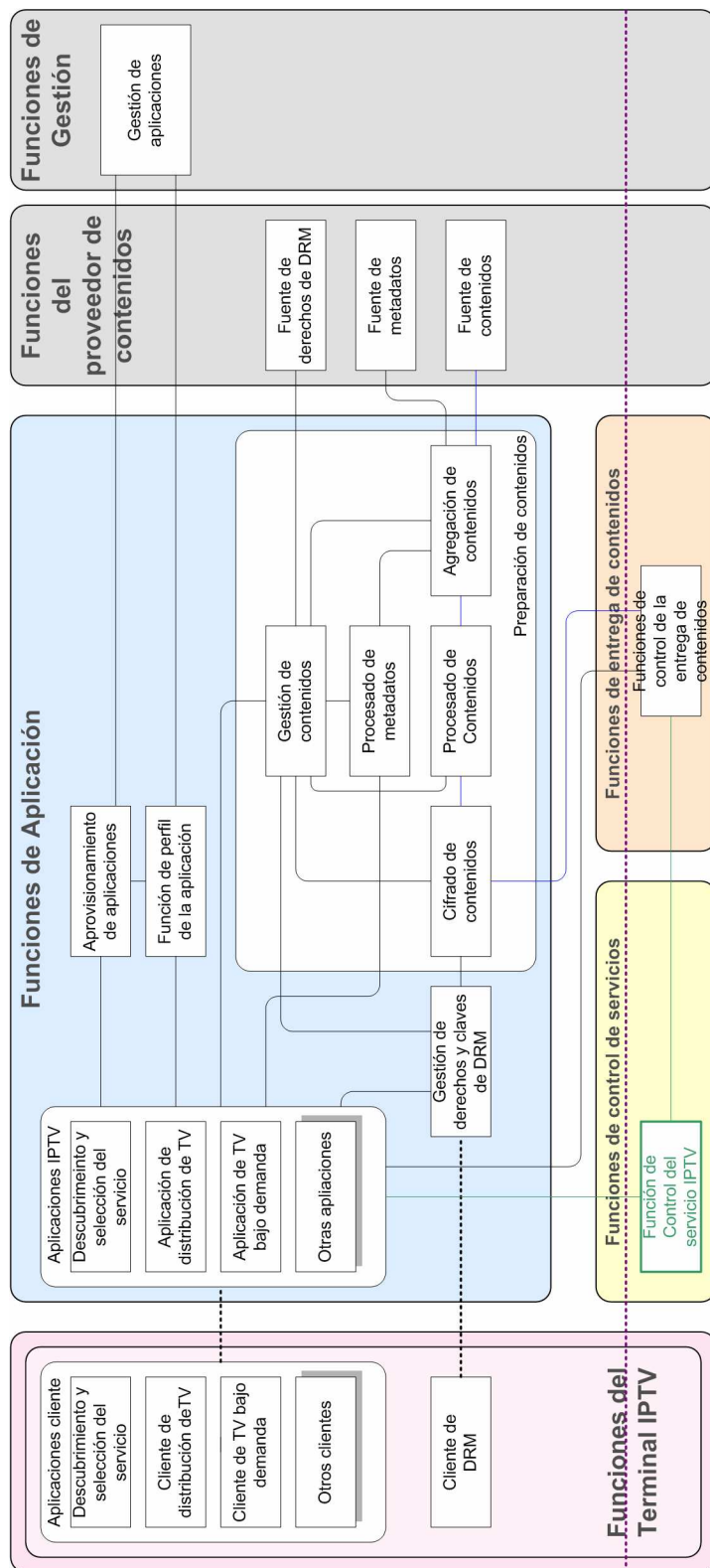
- Arquitectura funcional IPTV no-NGN. Por ejemplo, la arquitectura actual de Imagenio.
- Arquitectura funcional IPTV NGN no-IMS.
- Arquitectura funcional IPTV NGN IMS (ver Figura 118).

Obsérvese que el nivel de definición es todavía muy vago. Los trabajos se han centrado principalmente en la definición de requisitos y la asignación de grupos funcionales dentro de la cadena de valor de entrega del servicio, pero aún se encuentra en etapas preliminares. Sólo conviene destacar que en este esfuerzo de estandarización se encuentran involucrados ATIS IPTV *Interoperability Forum* (IIF), el DSL Forum, el proyecto DVB, ETSI TISPAN y la *Home Gateway Initiative* (HGI); y además, como se deduce de las arquitecturas IPTV NGN con y sin IMS, la convergencia de redes está entre sus objetivos.



Fuente: UIT-T

Figura 117. Arquitectura funcional marco de IPTV



Fuente: UIT-T

Figura 118. Arquitectura funcional de IPTV NGN IMS

3.4 La otra aproximación: Convergencia a partir de Internet

En la actualidad existen varios proyectos que tienen como objetivo común el convertir a la Internet en “La Red”, es decir, la Red Única para todos los servicios. Pero en vez de tomar como punto de partida las redes públicas y evolucionarlas sobre una red IP controlada, aquí el punto de partida es la Internet. Se trata de identificar sus limitaciones e intentar definir los requisitos para que la nueva Internet no sufra de las limitaciones actuales; en cierto sentido, Internet se convertiría en una red “controlada”, que podría soportar todo tipo de servicios.

La hipótesis inicial es que la Internet actual ya no es capaz de hacer frente a los incrementos previstos. Algunas cifras para poner en contexto el volumen de la Internet actual son [150]:

- En julio de 2008 se estima que el número de *hosts* conectados es de 570 millones (1.500 millones de usuarios), y se espera que en el 2011 sea de 3000 millones.
- El tráfico de Internet se multiplicará por 3 en el 2011 frente a los volúmenes actuales, y su naturaleza seguirá cambiando hacia más fuentes de streaming y vídeo en tiempo real.
- La Web procesa 100 millardos de clicks/segundo
- Se envían 2 millones de mensajes de correo electrónico por segundo, 1 millón de mensajes instantáneos por segundo.
- Existen 55 billones de enlaces entre páginas Web.

Hasta ahora la Internet ha hecho frente, con éxito, a su crecimiento y al cambio de las aplicaciones que la utilizan mediante una evolución ad-hoc, abordando los problemas según iban apareciendo. Es la aproximación evolutiva de la que se pueden citar como ejemplos: CIDR, NAT, MPLS, extensiones al BGP, IPSEC, DNSSEC, IP móvil, varios protocolos de nivel de aplicación para soportar *streaming* de vídeo y VoIP, etc. Esta evolución hace que la Internet se aparte de sus principios “fundacionales” de sencillez y extremo-a-extremo, y además sufra de lo que algunos expertos califican como “osificación”, que puede definirse como la resistencia natural que se ofrece a los cambios tecnológicos y que se ejemplifica por el escaso despliegue que han tenido el *multicast* IP o una tecnología más disruptiva como el IPv6.

Básicamente, las principales limitaciones de la arquitectura actual de Internet son:

- Movilidad.
- Calidad de Servicio.
- Seguridad.

- Disponibilidad, fiabilidad: el referente es la disponibilidad 0,99999 de la red telefónica.
- Escalabilidad: se prevé una nueva crisis de direcciones para el 2012.
- Economía: soporte de los distintos modelos de negocio de los diversos actores de la red.

Para todas ellas hay soluciones, parcheadas en cierto grado sobre el primitivo concepto de la Internet, y que gradualmente aumentan la complejidad e ineficiencia de la red.

De estas limitaciones y de otros requisitos, como la explosión del número de dispositivos por la introducción de la “Internet de las cosas”, surgen una serie de requisitos que debe cumplir la nueva Internet [151]:

- “*Open, wide-scale accessibility, application neutrality, transparency and generic purpose*”
- Desacoplar las aplicaciones de los protocolos de comunicación.
- Desacoplar el direccionamiento de red de los identificadores de aplicación y de la identificación y localización del usuario.
- Mejorar la seguridad, supervivencia, robustez, escalabilidad, prestaciones, adaptabilidad y capacidad de evolución de la Red.
- Facilidad de conectar terminales y utilización de cualquier red de acceso.
- Soportar cualquier tipo de protocolo de nivel de transporte y tipo de tráfico (*multicast, anycast*).
- Control y gestión distribuidos.
- Soportar según se requiera anonimato y trazabilidad.
- Eficiencia.

Todo ello hace que tanto en EE.UU. como en Europa se hayan lanzado iniciativas a largo plazo (10-15 años) para diseñar la red del futuro, en una aproximación que supone una ruptura con la actual Internet (o cualquier otra red) y que trata de dar respuesta a todos los retos de un entorno de comunicaciones convergentes. Ambas aproximaciones siguen la estrategia “*clean slate*”, es decir, diseño de la red desde cero, sin tener en cuenta ni la arquitectura ni los servicios soportados por la Internet actual²⁷.

En Estados Unidos, la iniciativa está financiada por la *National Science Foundation* (NSF) y recibe el nombre de FIND (*Future INternet Design*), con gran participación de la industria y de las universidades, con la Universidad de Stanford como actor destacable. Adicionalmente, la NSF soporta una red experimental GENI (*Global*

²⁷ Un ejemplo de la estrategia de *thinking out of the box*

Environment for Network Innovations), que permite realizar pruebas de concepto de las ideas que surjan en el entorno de FIND²⁸.

El equivalente europeo es la iniciativa FIRE (*Future Internet Research and Experimentation*) [152] dentro del 7º Programa Marco. Entre los documentos que esta iniciativa toma como referencias están los resultados del “*Think Tank*” Eiffel [153], el Informe Final del Grupo de Trabajo sobre Internet del Futuro de las autoridades públicas nacionales europeas de las TIC y el documento [150] que recoge la Visión sobre la Internet del Futuro de las Plataformas Tecnológicas Europeas más implicadas en los temas de TIC: eMobility, NEM, NESSI, ISSI y EPoSS. De este último documento se extraen las líneas principales de esta Internet del futuro que se condensan en la Figura 119.

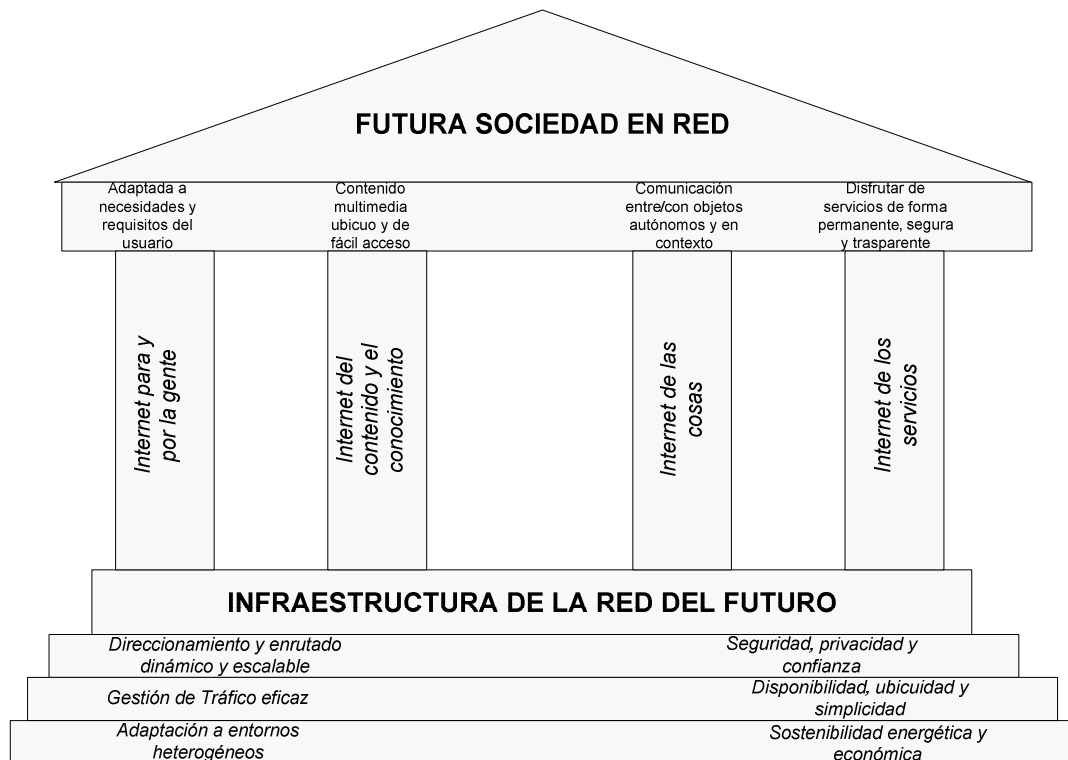


Figura 119. La red del futuro

La red del futuro se basa en cuatro pilares a través de los cuales la sociedad la percibe: La Internet para la gente, La Internet de los Contenidos y el Conocimiento, la Internet de las Cosas (objetos que se comunican entre sí de forma autónoma) y la Internet de los servicios que se ofrecen a la sociedad de forma ubicua y transparente al modo de acceso.

²⁸ Y de otros proyectos de innovación, ya que GENI está abierta a cualquier tipo de experimentación en el campo de las redes.

Esta Red se basa sobre una infraestructura que se caracteriza por:

- Nuevo encaminamiento-direccionamiento: espacio de direccionamiento basado en el usuario en vez de puntos de red; el sistema de encaminamiento debe escalar de forma sub-lineal (crecer con el $\log(N)$ en vez de N , siendo N el número de nodos); propiedades de robustez, estabilidad y convergencia del sistema de encaminamiento.
- Heterogeneidad: de dispositivos, entornos, aplicaciones que cooperan.
- Seguridad, privacidad, confianza y capacidad de atribución (trazabilidad): la Internet actual está plagada de amenazas en forma de virus y gusanos, ataques de denegación de servicio, además de molestias en forma de *spam*. Todo esto hace que los usuarios no confíen plenamente en la red, lo que consecuentemente constituye una barrera para el despliegue del comercio electrónico en todo su potencial. La confianza a su vez va ligada a la garantía de la privacidad, que tiene que estar equilibrada con la capacidad de atribuir autoría en caso de necesidad.
- Movilidad de comunicaciones de banda ancha: el objetivo sería la prestación del servicio tanto en funcionalidad como en calidad, independientemente de la ubicación o estado de reposo o movimiento del usuario. Que éste no percibiera ninguna diferencia entre un acceso guiado y uno inalámbrico de banda ancha. Las soluciones de IP móvil, e incluso IPv6, no consiguen alcanzar los objetivos.
- Disponibilidad, Fiabilidad y Garantía de la Calidad de Servicio.

Hay que tener presente que una de las ideas de la aproximación *clean slate* es abordar todos estos objetivos de una forma conjunta, en contraposición a la estrategia actual de abordarlos con parches de forma separada. Esto supone, por ejemplo, que hay que abordar el problema de escalabilidad de nuevos esquemas de nombrado y direccionamiento realizando despliegues a escalas significativas; de ahí el papel importante de las redes de experimentación como GENI en EE.UU. y GEANT 2 en Europa, y las tecnologías de virtualización que permiten montar las nuevas propuestas de infraestructura de red sobre nodos virtuales implementados sobre nodos reales y realizando “indirección” de las direcciones de la nueva propuesta sobre las direcciones reales de la red de experimentación.

En la actualidad los esfuerzos están dispersos y la normalización es escasa, coherente con un período de investigación conceptual, incluso previo a una experimentación de cierta envergadura... pero conviene observar la evolución de estos proyectos, ¡en los setenta la Internet existía y nadie la observaba desde el punto de vista de redes públicas!

3.5 Conclusiones

Citando a Niels Bohr: “La predicción es muy difícil, especialmente acerca del futuro”. De la exposición lineal de este capítulo podría inferirse que la red convergente de un futuro más o menos cercano podría ser la red NGN-IMS. Aunque es cierto que entre los principales suministradores de equipos de telecomunicación anuncian más de 300 implementaciones entre aplicaciones comerciales y prototipos, no se ha encontrado ningún despliegue de la suficiente entidad como para proveer servicios avanzados en una red pública de tamaño significativo, a pesar de que las bases de la arquitectura están desde el *Release 5* del 3GPP del primer trimestre de 2002.

Por otro lado la demanda de nuevos servicios se va cubriendo con la tecnología actual. Un ejemplo es la IPTV, que se está proporcionando con tecnología no-NGN, y alcanzaba los 15 millones de abonados a nivel mundial en julio de 2008, habiendo doblado la cifra en un año. Análogamente, la demanda de conexiones a Internet de alta velocidad está siendo cubierta, y en el móvil también, con tecnologías pre-NGN, y nuevamente adquiriendo volúmenes considerables.

Además, la multitud de redes enumeradas en el apartado 3.1 se van simplificando por obsolescencia natural: circuitos alquilados, X.25, etc. irán siendo sustituidos por accesos xDSL de forma cada vez más acelerada.

Una red, basada en IMS e IP con garantía de QoS, requiere una inversión que debe ser recuperada por los ingresos de los nuevos servicios, cuyo valor debe ser reconocido por los usuarios que estén dispuestos a pagarlos. ¿Existen estas *killer applications* que justifiquen una reestructuración tan sustancial de la red?, ¿se puede correr el riesgo de hacer el despliegue confiando en que las aplicaciones ya vendrán (aproximación *field of dreams*)?

Y ¿qué se hace con la planta instalada que está dando de forma eficiente el servicio requerido? Dice un viejo chiste de la industria de telecomunicaciones: “Dios pudo crear el mundo en siete días porque no había usuarios y sistemas anteriores”.

4 ENTORNO DE COMPETENCIA

El sector de las telecomunicaciones a nivel mundial se ha visto favorecido por las buenas condiciones económicas de los últimos años hasta 2008. Como ejemplo, en 2007 la facturación mundial aumentó alrededor del 6,2%. Este crecimiento se basó fundamentalmente en el volumen de negocio de la telefonía móvil y el aumento de la demanda de conexiones de banda ancha, que compensó con creces la disminución de los ingresos de los servicios de voz en redes fijas [154]. Al final del segundo trimestre de 2008 se estimaban en 382,4 millones los abonados de banda ancha en el mundo, con un aumento interanual de 65 millones [155], sobrepasándose los 400 millones de abonados en noviembre de 2008 [156].

La política de liberalización de los servicios de telecomunicación, que arrancó a mediados de los ochenta en Estados Unidos y posteriormente se extendió a Europa en los noventa, tenía como objetivo promover la competencia, para reducir precios y favorecer el despliegue de servicios innovadores.

Atendiendo a la evolución de los precios de los servicios en Europa, según la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT), el índice de precios al consumo armonizado para la UE y para España de este segmento mostró en el periodo 2001 - 2007 una tendencia decreciente, con un descenso acumulado de casi el 10%.

En cuanto a la innovación, el sector de las telecomunicaciones se viene mostrando muy dinámico a nivel global. La tendencia a la utilización de servicios de banda ancha con independencia de la tecnología de acceso y el incremento en el uso de la banda ancha en el móvil y de las tecnologías inalámbricas, que se ven como una alternativa para aumentar la cobertura de la banda ancha, continúan estimulando la innovación en productos y servicios. Así mismo, los nuevos servicios de comunicaciones en Internet han desarrollado nuevas formas de entrega y uso de los contenidos. La Web 2.0 y las redes sociales han otorgado un papel protagonista y central al usuario, que junto a una utilización creciente de la interactividad, se han convertido en los elementos clave de la innovación en servicios [157].

La innovación, sin embargo, no se refiere en exclusiva a la utilización de tecnologías novedosas. En lo referente a la comercialización de servicios, especialmente en los mercados desarrollados, la competencia ha evolucionado hacia un mayor empaquetamiento de servicios, que incluye no sólo acceso fijo de voz, datos y televisión, sino también acceso móvil de voz y datos [158].

Otro aspecto importante en el entorno competitivo es el fenómeno de consolidación de operadores, que resurgió fuertemente en 2007 y que continuó en 2008. Esta consolidación se está produciendo en tres líneas no necesariamente excluyentes: aparición de grandes operadores a nivel regional, consolidación de operadores convergentes fijo-móvil y consolidación de pequeños y medianos operadores por segmentos tecnológicos, como el mercado de banda ancha. La consolidación

regional, con alguna excepción ya multinacional como Telefónica, aparece tanto en Europa como en Estados Unidos, Asia y Latinoamérica²⁹, y tiene como consecuencia la formación de nuevos operadores de gran dimensión.

El entorno competitivo difiere de unas áreas geográficas a otras, debido principalmente a los diversos enfoques seguidos en la regulación de los respectivos mercados, así como al papel adoptado por los actores públicos.

En Estados Unidos se inició la liberalización una década antes que en Europa, imponiendo la ruptura de los monopolios por ley y aprobando las reglas de desagregación propuestas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), después de diez años de litigios que finalizaron en el año 2006 con la denominada “COVAD Order” [159]. La situación actual es la de un mercado muy competitivo, con operadores de cable fuertes y operadores regionales tanto o más, resultado de adquisiciones como la de BellSouth por parte de AT&T, antigua SBC, o la de MCI por Verizon Communications. Sin embargo, la legislación estadounidense aún tiene pendiente el tema de la neutralidad de red (*net neutrality*), en el que está en discusión el asegurar el tratamiento en condiciones “igualitarias” del tráfico que circula por Internet, con independencia del contenido y de quien lo emita o lo reciba. En el fondo, subyace la búsqueda de un modelo de negocio aceptable para proveedores de contenidos y proveedores de infraestructura, al mismo tiempo que se aseguren los derechos de los usuarios.

Por otra parte, en la región de Asia-Pacífico, hay grandes diferencias entre los países emergentes y Japón y Corea. En estos dos países los mercados se han desarrollado con una alta participación pública, que los han situado a la cabeza de los despliegues de banda muy ancha basados en FTTx, entre otras tecnologías.

En Latinoamérica se observa un mercado emergente, creciente y dinámico, tanto por el despliegue de nuevos servicios como por los movimientos de los operadores, con la consolidación de importantes operadores regionales. Las locomotoras de dicho mercado son Brasil y México, especialmente el primero que, con el apoyo de las políticas públicas, pasó de la universalización del servicio de telefonía básica, con la reforma del sector a finales de los 90, a ser uno de los países con mayor crecimiento del mundo en abonados de banda ancha en el primer semestre de 2008.

En Europa se está inmerso en un proceso de cambio de regulación, después de un periodo de aproximadamente diez años de apertura de mercados a la competencia. Este nuevo proceso se justifica, según la Comisaría de la Sociedad de la Información y Medios de Comunicación de la Unión Europea, porque aún queda mucho por hacer en este ámbito [162] [164]-[167].

En las secciones 4.1 y 4.2 se analizan respectivamente las tendencias competitivas en los segmentos de mercado de acceso de banda ancha y de acceso móvil a nivel mundial, por ser los dos motores del crecimiento del sector de las telecomunicaciones en la actualidad. Posteriormente se aborda en detalle el mercado de telecomunicaciones en Europa (sección 4.3) y, dentro de éste, el mercado en

España (sección 4.4). El propósito de este análisis consiste en ofrecer datos sobre el grado de competencia en que se encuentran los mercados estudiados y la situación e influencia de los procesos regulatorios en curso.

4.1 La competencia en el mercado de banda ancha

En el segmento del mercado de acceso fijo de banda ancha pueden distinguirse dos tipos de escenarios para establecer la competencia entre operadores: intermodal e intramodal. La competencia clásica es la competencia intermodal, que involucra a dos operadores con redes de acceso independientes, por ejemplo dos operadores con plataformas distintas, uno de ellos de telecomunicación por cable que proporciona acceso a Internet mediante módems de cable y el otro con servicio ADSL.

La competencia intramodal se produce cuando varios operadores utilizan el mismo tipo de red de acceso, por ejemplo dos operadores que ofrecen acceso ADSL sobre par telefónico. Aparentemente, este tipo de competencia es la más fácil de implantar, debido a que no es necesario desplegar nuevas infraestructuras de acceso. Sin embargo, y a pesar del agresivo lanzamiento de operadores alternativos de ADSL, en muchos casos éstos no han podido obtener una cuota significativa del mercado, permaneciendo un porcentaje elevado en poder de los operadores históricos.

En el escenario intermodal, en principio, los operadores dispondrían de todas las tecnologías de acceso existentes: par telefónico, cable HFC, fijo inalámbrico, móvil, satélite, etc. Sin embargo, en la actualidad, las alternativas cableadas son las más representativas tanto desde el punto de vista de mercado como de adecuación de características técnicas. De todas formas, en los próximos años habrá que tener en cuenta la evolución de tecnologías como el acceso fijo inalámbrico y el móvil de banda ancha, que están aumentando su cuota de mercado [155].

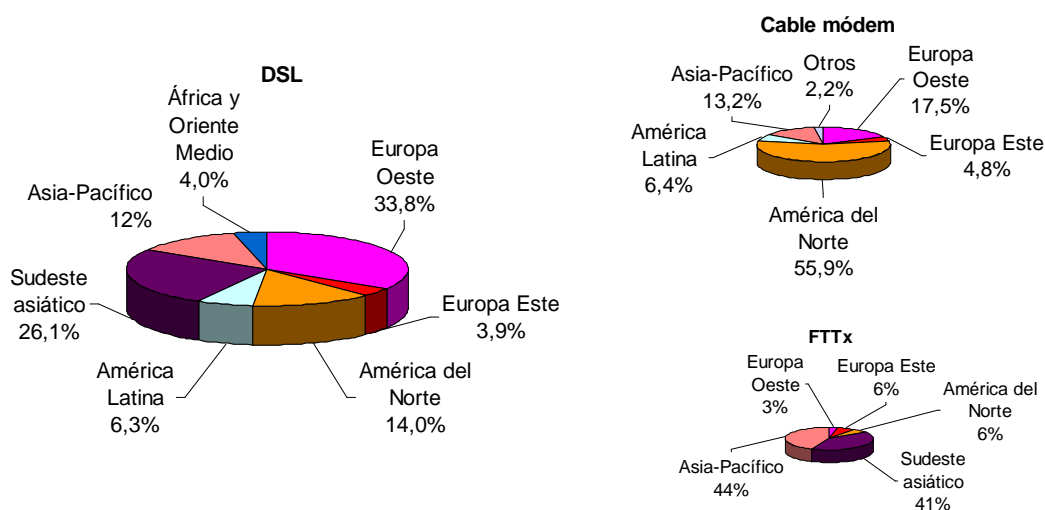
Se considera que un número reducido de operadores independientes³⁰ genera suficiente competencia en precios e innovación. Este número, según diversos autores, se encuentra entre dos y cuatro [160]. El hecho de que las tecnologías cableadas hayan sido las dominantes hasta la fecha influye en el entorno competitivo, especialmente en los países desarrollados en los que el operador histórico controlaba el acceso. En estos casos, existía como mucho un duopolio en las áreas con despliegue de cable HFC, como ocurre en diversos países europeos. Por otra parte, hay que tener en cuenta que los sistemas de cable tienen una penetración reducida en el mercado empresarial, con la mayoría de empresas

³⁰ Aquellos operadores que controlan sus propias infraestructuras de red y tienen capacidad autónoma suficiente de inversión e innovación, tales como los operadores históricos y operadores de cable.

dependiendo en gran medida de la red del operador dominante. Cuando se dan ambos factores, la existencia de duopolios y la escasa penetración en el segmento empresarial de la plataforma competidora, se puede interpretar que el grado de competencia es mejorable, según el criterio indicado con anterioridad.

Si se analiza el mercado en los países que han ido hacia un modelo del sector basado en competencia entre plataformas, en general intermodal, como Estados Unidos, Holanda, Corea del Sur, Chile y Canadá, se ve que dicho duopolio no se mantiene en la mayoría de ellos. Tampoco se mantiene en algunos segmentos de mercado, tales como banda ancha, telefonía móvil y distribución de contenidos.

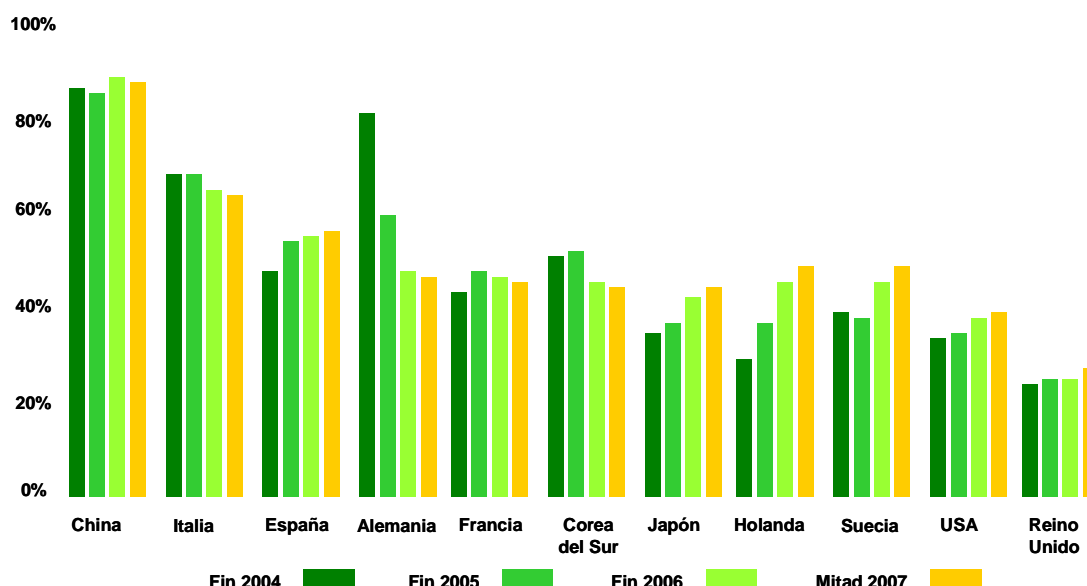
En la Figura 120 se representa la distribución del mercado mundial de banda ancha atendiendo a los principales tipos de tecnología de acceso. Llama la atención el distinto grado de implantación de dichas tecnologías por áreas geográficas que, como se ha comentado anteriormente, tiene relación con la situación histórica de cada región y con las políticas, más recientes, de regulación e inversión en cada una de ellas. A nivel mundial a segundo trimestre de 2008, la cuota en número de usuarios de las tecnologías de banda ancha era la siguiente: DSL 64,64%, Cable módem 21,46%, FTTx 11,8 % y 2.11% otras tecnologías [155], lo que se refleja de forma orientativa en el tamaño de los gráficos de la figura citada anteriormente.



Fuente: EnterData a partir de Point Topic

Figura 120. Distribución de tecnologías fijas de banda ancha en el mundo: II trimestre 2008.

En la Figura 121, sobre datos procedentes de [158], se da una visión de la evolución de la competencia en el mercado residencial de banda ancha en términos de cuota de mercado del operador histórico en los países más representativos a nivel mundial. Hay que resaltar que sólo en tres de los once países considerados se aprecia un aumento de la competencia entre los años 2004 y 2007.



Fuente: IDATE

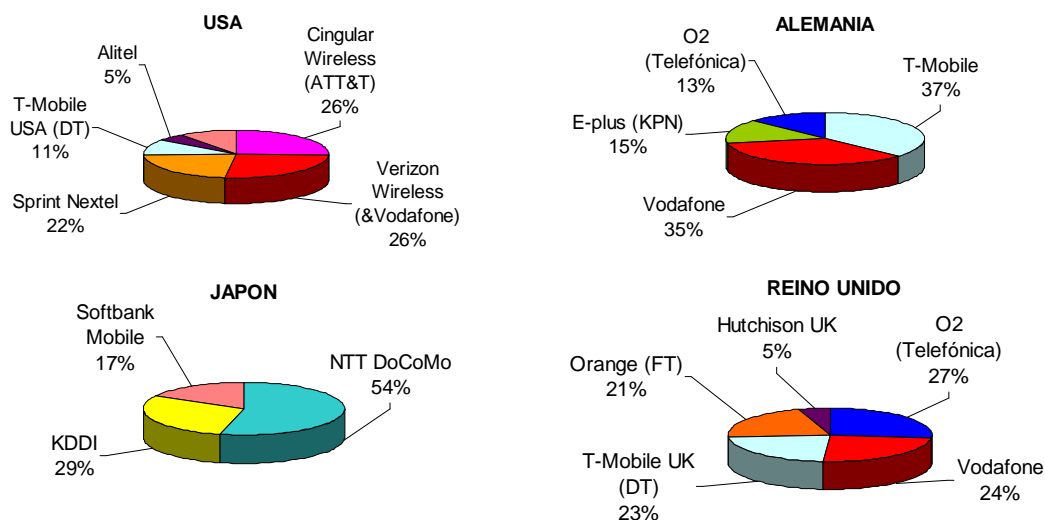
Figura 121. Competencia en el mercado de banda ancha: cuota de mercado del operador histórico.

4.2 La competencia en el mercado de acceso móvil

Desde el punto de vista de competencia, el segmento de mercado de comunicaciones móviles presenta, en términos generales, mayores grados de competencia que el de banda ancha. En la Figura 122 se muestra el ejemplo de los cuatro países más industrializados a mediados de 2007 [158], observándose que las cuotas de mercado de los distintos operadores son equilibradas prácticamente en todos los países y tienen altos grados de competencia. También se pone de manifiesto en dicha figura que varios de los operadores con cuota de mercado apreciable son transnacionales, lo que indica la importancia de la dimensión.

En los países desarrollados, dada la saturación de los mercados, la competencia se centra en incentivar los nuevos servicios en el terminal móvil, por ejemplo video, televisión, mensajería instantánea y redes sociales móviles. El objetivo es doble, mejorar el ARPU y fidelizar a sus clientes.

Por otra parte, la disponibilidad de la tecnología HSPA, que excede el 70% en muchos países europeos [161], está animando a los operadores a desarrollar los servicios residenciales de banda ancha móvil. Este es un nuevo factor de competencia “convergente” entre los diferentes segmentos de mercado fijo y móvil.



Fuente: IDATE

Figura 122. Competencia en el mercado móvil.

Desde el inicio de 2007 la estructura de la competencia en el mercado móvil ha cambiado debido a la aparición de numerosos Operadores Móviles Virtuales (OMVs o MVNOs). Las cuotas de mercado de este tipo de operadores frente a los operadores propietarios de las infraestructuras varían mucho de un país a otro. En 2007 tenían cuotas apreciables en Alemania (28%)³¹ y Reino Unido (14%)³¹, cuotas medias-bajas en Estados Unidos (8%), Francia (6%), Holanda (6%) y Canadá (4%), y poco representativas, inferiores al 2%, en España, Suecia e Italia, según datos publicados por Ofcom a finales de 2008 [161].

La mayoría de los MVNOs, al menos en Europa, han posicionado su marca en mercados masivos de bajo coste, por ejemplo, los grandes distribuidores, siendo varios de ellos de carácter paneuropeo (Simyo, Carrefour,...). Otro grupo importante se trata de operadores cuyo objetivo es principalmente el empaquetamiento de servicios (Virgin, Euskaltel,...). Por último, hay MVNOs que se dirigen a nichos específicos de mercado, por ejemplo aquellos cuyo consumidor objetivo tiene raíces familiares en otros países (Lycatel, Lebara,...).

Otro aspecto muy importante en el desarrollo del mercado de acceso móvil es el relacionado con el espectro radioeléctrico. Tanto en Estados Unidos como en Europa está ampliándose el espectro para comunicaciones móviles hacia las zonas liberadas por la televisión o las comunicaciones militares. Esto permitirá una mayor rentabilidad para los operadores establecidos y/o la aparición de nuevos entrantes.

4.3 Situación en Europa

Los siguientes datos, hechos públicos por la Comisaria de Sociedad de la Información y Medios de Comunicación de la Unión Europea (UE) en [162], dan una idea general de la situación de la competencia en el sector en Europa:

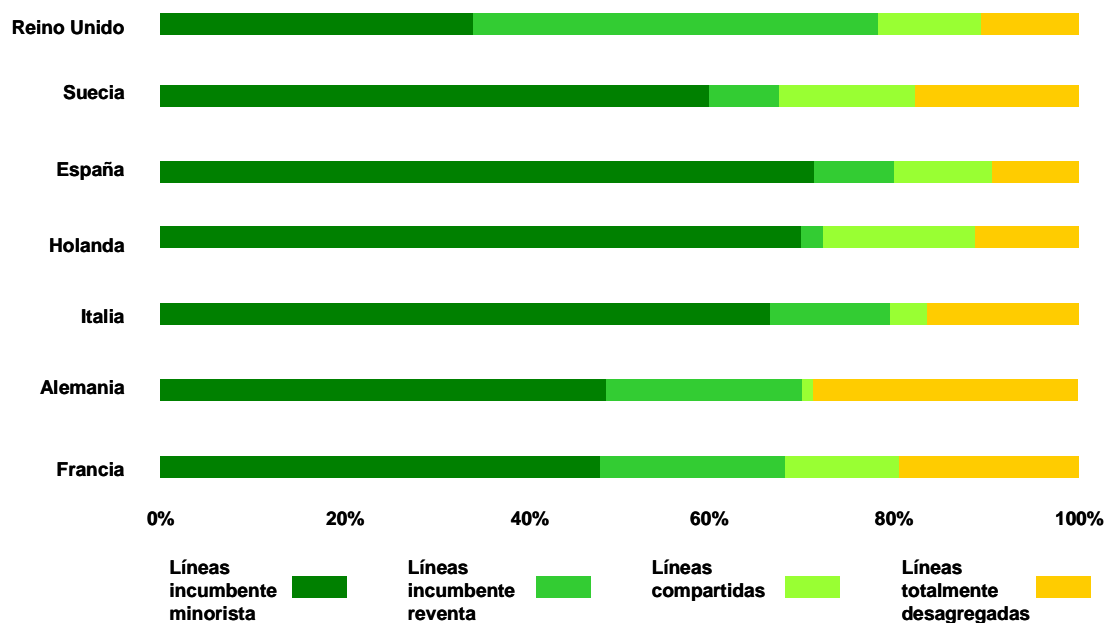
- En lo que respecta al mercado de servicios móviles, tres de cada cuatro ciudadanos europeos son usuarios de uno de los cuatro principales grupos de móviles: Deutsche Telekom, Vodafone, Orange y Telefónica. Tres de estos grupos son filiales de operadores dominantes fijos.
- En cuanto al mercado minorista de banda ancha, la cuota de mercado de los operadores históricos se mantiene estable en torno al 45% en 2008.
- El 81,7% de los abonados fijos dependen de la infraestructura del operador preexistente.

Según la citada Comisaria, la interpretación de los datos anteriores tiene una doble vertiente. Por un lado, pueden indicar la fortaleza económica y la capacidad de los operadores dominantes. Pero también indican que, después de diez años de apertura de los mercados a la competencia, todavía queda mucho por hacer en regulación para llegar a mercados realmente competitivos [162].

La competencia en el mercado europeo se ha generado por dos vías. Una, mediante operadores entrantes con red propia, como los de cable y los nuevos con despliegues de fibra. La otra, gracias a la regulación de los servicios mayoristas, como son el acceso indirecto y la desagregación del bucle.

Según el XIII Informe de Implementación 2008 de la Comisión Europea, en el año 2007 el servicio regulado de mayor éxito en la UE fue el de desagregación del bucle de abonado, con un incremento interanual de líneas del 12,8%, llegando a 23,5 millones de líneas. El bucle completamente desagregado creció un 54,2%, hasta 16,8 millones, y el bucle parcialmente desagregado aumentó con una tasa interanual del 33,8%, llegando a 6,7 millones de líneas. Estos datos ilustran el grado de competencia intramodal en Europa, cuyo detalle para los países más representativos se muestra en la Figura 123.

Según las cifras publicadas en un reciente informe de la Asociación Europea de Telecomunicaciones Competitivas (ECTA) [163], el número total de líneas de banda ancha en la Unión Europea alcanzó los 110,5 millones en septiembre de 2008. Los operadores dominantes mantenían el 50% del total del mercado minorista, incluyendo reventa, y 45% sin incluirla. Indica también este informe que la mayor fuente de competencia en la UE es la apertura del bucle local (44% de todas las líneas suministradas por los competidores), seguida por el cable y otras infraestructuras (36%).



Fuente: IDATE

Figura 123. Desagregación en Europa: líneas DSL mitad 2007 (competencia intramodal).

4.3.1 Reforma legislativa en la UE: el “paquete de telecomunicaciones”

Como se ha indicado anteriormente, Europa optó en los años 90 por liberalizar el mercado de telecomunicaciones mediante la regulación de los operadores tradicionales por normas específicas sectoriales administradas por los organismos reguladores nacionales. Este proceso, no disruptivo y más lento que el empleado en Estados Unidos, aunque ha conseguido algunos éxitos en el pasado, todavía no se ha completado [162]. En noviembre de 2007, la Comisión propuso el denominado “Paquete de Telecomunicaciones” para reformar la normativa comunitaria del sector, con el propósito de crear un mercado único de las telecomunicaciones que aportara más derechos a los consumidores y las empresas, más competencia y más inversión para impulsar la adopción de los servicios transfronterizos³² y de banda ancha inalámbrica de alta velocidad para todos [164] [165] [166].

En noviembre de 2008 la Comisión Europea presentó los nuevos textos legislativos del paquete de reforma de las telecomunicaciones en la UE, una vez discutidos y votados en el Parlamento y en el Consejo Europeos, para su debate en el Consejo de Ministros de Telecomunicaciones del 27 de ese mismo mes [167]. Esta legislación marcará el desarrollo de la competencia en Europa en el sector en los próximos años, debiendo ser incorporada al Derecho interno de los 27 Estados miembros de la UE en 2010 como tarde. Las líneas básicas del nuevo marco competitivo planteadas

por la Comisión son las siguientes [167]:

- Creación de una nueva oficina de los reguladores europeos de las telecomunicaciones, denominada «Organismo de Reguladores Europeos de Telecomunicaciones», que aportará mayor coherencia a las medidas reguladoras impuestas a los mercados de telecomunicaciones en Europa.
- Los reguladores nacionales serán los únicos competentes para imponer la separación funcional³³, cuando resulte necesaria para eliminar obstáculos que dificulten la competencia.
- En lo que se refiere a la política del espectro radioeléctrico, se reforzará su coordinación estratégica a nivel político a través de un proceso en virtud del cual se presentará un programa plurianual de política del espectro radioeléctrico para la UE.
- En cuanto a la inversión en nuevas redes, el Parlamento ha confirmado y reforzado la actual normativa comunitaria aplicable a la inversión en las redes de banda ancha de alta velocidad, rechazando las solicitudes de «vacaciones reguladoras» y promoviendo la inversión eficiente en nuevas redes de fibra óptica. En la misma línea, en 2009 se presentarán las directrices detalladas sobre las redes de acceso de próxima generación.

El enfoque general del nuevo marco regulatorio es, a diferencia del actual, potenciar la regulación “ex post” frente a la “ex ante”, así como los acuerdos comerciales entre operadores.

4.4 Situación en España

Según el informe anual de 2007 publicado por la CMT [154], el sector de las comunicaciones electrónicas en España creció el 4,6% en 2007 que, considerando la inflación, supone una situación estable respecto al año anterior. Los subsegmentos con mayor crecimiento fueron el acceso a Internet, las comunicaciones móviles y el audiovisual. Dos causas con efectos opuestos explican el escaso crecimiento neto: en un sentido, un incremento moderado de la actividad y, en el opuesto, el aumento de la presión competitiva y el consiguiente descenso de los precios. También se aprecia estabilidad en el acumulado a final de 2008 respecto a 2007 sin considerar la inflación, con el mayor crecimiento en el acceso Internet, seguido por un ligero crecimiento en el subsegmento de comunicaciones móviles y una caída, también ligera, en el de servicios audiovisuales.

En 2008 en lo relativo a las comunicaciones móviles, al igual que en 2007, sigue aumentando el número de clientes, debido al incremento de demanda de servicios de tercera generación y la actividad del cuarto operador de red y de los operadores

³³ La separación funcional consiste en exigir a un operador dominante que separe su infraestructura de red de su negocio de servicios, sin modificar la estructura de la propiedad.

móviles virtuales, con el consiguiente aumento de la presión competitiva en este mercado. El año 2008 se cierra con un total de 50,89 millones de líneas, lo que supone un 3,7% más respecto al total registrado en diciembre de 2007 y una proporción de 112,6 líneas por cada 100 habitantes [168].

La banda ancha en 2008 experimentó un crecimiento interanual del 12,9%, llegando a alcanzar los 9,06 millones de líneas a finales de 2008 y una penetración del 20% respecto a la población. En relación a Europa, en enero de 2008, los índices de penetración de banda ancha en España continuaban siendo inferiores a la media de la Unión Europea, alcanzando respectivamente el 18,3% y el 20,0% en número de líneas, ocupando el puesto duodécimo entre los países de la UE. Según datos del Índice de Prestaciones de Banda ancha (*Broadband Performance Index*, BPI³⁴), España mejoraba ligeramente, ocupando el puesto número once [169].

Por último, el sector audiovisual en 2007 registró un aumento significativo de los ingresos, el 7,9%, pero principalmente debido a la publicidad emitida en televisión, lo que contrasta con la tendencia observada hasta el tercer trimestre de 2008, periodo en el que los ingresos acumulados muestran una ligerísima caída. En cuanto a los servicios de TV de pago, más relacionados con el mercado de acceso, el mayor crecimiento fue debido a la TV IP, que consiguió un crecimiento del 39,3% en número de abonados en el tercer trimestre de 2008 respecto al mismo periodo de 2007 [145].

Al igual que en otros mercados desarrollados, en España está evolucionando la competencia en servicios, según se comentó al principio de este capítulo. En efecto, en los últimos años se ha ido hacia el empaquetamiento de servicios, especialmente desde el año 2005, estimulado por la entrada de los operadores de telecomunicación fijos en el mercado audiovisual a través de ofertas de TV IP, como una reacción ante la competencia creciente de los operadores de cable y para compensar la caída de ventas en servicios de voz tradicional. Los operadores de cable hasta ese momento eran los únicos que ofrecían el denominado *triple play*, servicio conjunto de voz, datos y televisión.

Según el último Informe de Implementación de la Comisión Europea, España mostraba una intensidad de empaquetamiento mayor que la media europea, detrás de Irlanda y Alemania y similar a Francia, Holanda, Reino Unido y Austria. Un dato ilustrativo es que el 91% de las líneas de banda ancha en 2007 fueron contratadas con la voz, mientras que el porcentaje de usuarios que añadió la voz y la televisión llegó al 15%. Últimamente, este empaquetamiento está evolucionando hacia el *quadruple play*, que incorpora ofertas conjuntas de los servicios fijos citados anteriormente con servicios de voz y acceso móvil a Internet.

Las siguientes tablas, extraídas del informe anual de 2007 y de las notas mensuales y estadísticas trimestrales de 2008 de la CMT [154] [168] [170] son ilustrativas de la situación de la competencia en el mercado español.

³⁴ BPI: Indicador multidimensional definido por la Comisión que contempla seis factores: contexto socio-económico, despliegue de servicios avanzados, velocidades, precio, cobertura de la competencia y cobertura en áreas rurales.

La Tabla 49 muestra los accesos de banda ancha por tipo de tecnología soporte. Se observa una tasa de variación 5 puntos superior en las tecnologías DSL respecto al cable. Así mismo es apreciable el desequilibrio entre ambos, ya que el número de líneas de cable módem supone un 19,6% del conjunto.

Tabla 49. Líneas de banda ancha a final de 2008

	Líneas acumuladas	
	Dic. 2008	Tasa de variación (%) Dic. 08-Dic. 07
DSL	7.282.939	13,9
Telefónica de España	5.156.706	13,6
Otros	2.126.233	14,7
Cable módem	1.777.664	8,8
Total	9.060.603	12,9

Fuente: Nota Mensual diciembre 2008, CMT [168]

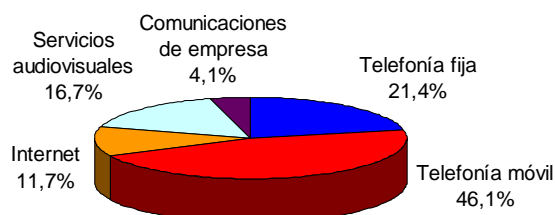
En los últimos tres meses de 2008 la captura de las nuevas líneas de banda ancha por parte del operador histórico fue del 51,7% (cuota de la ganancia neta de líneas), frente al 60% en 2007, mientras que los operadores de cable capturaron el 12,9% y el resto de operadores de DSL el 35,4%. En España, en el año 2007, el 56,2% (57,3% en 2008) de las conexiones de banda ancha por red fija fue suministrado por Telefónica, frente a una cuota de mercado media del 46,3% de los operadores históricos de la UE [154].

La Tabla 50 y la Figura 124 proporcionan la visión del mercado en cuanto a servicios minoristas a final de 2007 y de 2008.

Tabla 50. Ingresos acumulados por servicios minoristas (millones de €)

Servicio	Ingresos Fin 2007	Ingresos Fin 2008
Telefonía fija	7.499,65	7.012,73
Telefonía móvil	14.886,85	15.074,77
Internet	3.510,03	3.814,67
Servicios audiovisuales	5.768,38	5.456,43
Comunicaciones de empresa	1.335,42	1.354,56
Total	33.000,33	32.713,16

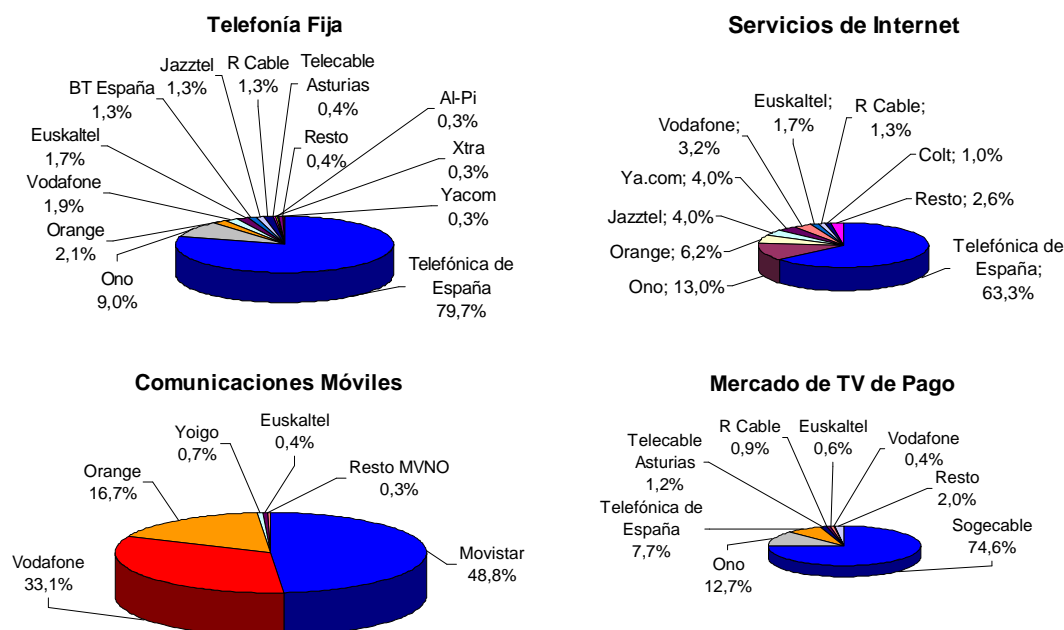
Fuente: Informe Anual 2007 y datos del 4º trimestre de 2008, CMT [154] y [170]



Fuente: CMT [170]

Figura 124. Servicios de telecomunicación minoristas (IV Trimestre 2008)

Por otra parte, la Figura 125 muestra el reparto de dicho mercado entre los distintos operadores en los segmentos más representativos. Para evaluar el grado de competencia en el mercado minorista hay que interpretar conjuntamente la tabla y figura referidas, ya que la mayor competencia se da también en el mayor mercado. La telefonía móvil en el año 2007 supuso más del 45% (46,3% en 2008) de todo el mercado de operación de servicios, la telefonía fija no llegó al 23% (21,6% en 2008), los servicios audiovisuales el 17,5% y el acceso a Internet algo menos del 11%, lo que se refleja de forma orientativa en el tamaño de los gráficos de la figura.

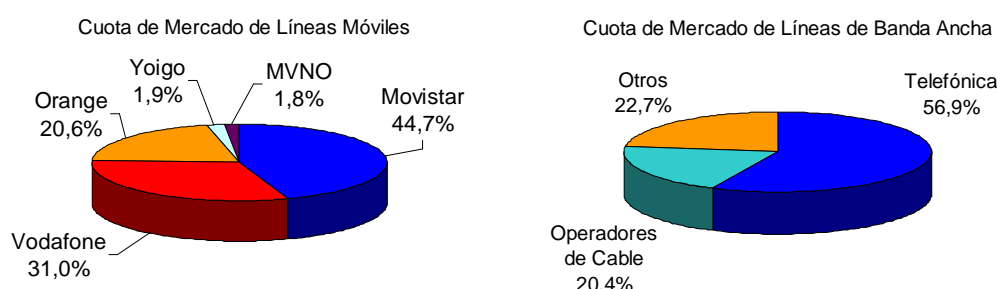


Fuente: CMT [170]

Figura 125. Cuotas de mercado de servicios minoristas sobre ingresos (2008)³⁵

En cuanto al mercado de la televisión de pago, cabe resaltar la aparición en 2007 de la tecnología de televisión móvil (*streaming* 3G), lo que explica la presencia de Vodafone con una cuota apreciable. En cuanto a las cuotas de mercado en número de abonados, excluyendo la televisión móvil, Digital+ alcanzó el 51,9%, Ono el 24,2%, Imagenio el 12,8%, Orange el 1,4% y el 9,7% el resto de los operadores.

Por último, la Figura 126 ilustra la evolución de las cuotas de mercado en número de líneas a final de 2008, tanto en banda ancha como en telefonía móvil. En cuanto a la telefonía móvil, se aprecia un incremento en la cuota de los operadores móviles virtuales, en conjunto pequeña, pero comparable a la del cuarto operador de red.



Fuente: Nota Mensual diciembre 2008, CMT [168]

Figura 126. Cuotas de mercado de telefonía móvil y banda ancha sobre número de líneas (2008)

Los agentes públicos pueden influir en el grado de implantación de la competencia mediante acciones directas, además de las acciones propias legislativas. Dentro de las primeras, el Gobierno de España puso en marcha el Plan Avanza en 2005, con un presupuesto ejecutado que supera los 6.500 millones de euros en el periodo 2006-2009. Entre sus objetivos figura potenciar el despliegue de infraestructuras de banda ancha fijas y móviles. Para ello, junto con las Comunidades Autónomas, ha desarrollado el Plan de Extensión de la Banda Ancha (PEBA) y el Plan de Extensión de Telefonía Móvil (E-GSM), para compensar el hecho de que el coste del despliegue de infraestructuras de telecomunicaciones en España es de los más elevados de Europa.

En cuanto a las acciones legislativas y regulatorias en los próximos años, el desarrollo general del marco regulatorio comunitario y su transposición nacional y el caso concreto de la regulación de las redes de fibra serán los grandes retos del sector por su influencia en la evolución de la competencia, los niveles de inversión a realizar por los operadores y los precios y servicios a los que accederán los usuarios. En enero de 2009 el Consejo de la CMT aprobó las medidas definitivas que regularán el despliegue de nuevas redes de fibra óptica. Este marco normativo ha sido uno de los primeros en aprobarse en Europa. En la Tabla 51 se sintetizan las obligaciones del operador con poder significativo de mercado (PSM) en los mercados de acceso físico a la red y de acceso indirecto de banda ancha según dicha regulación [171].

Tabla 51. Resumen de obligaciones Mercados 4 y 5

	Mercado 4: Acceso físico a la red	Mercado 5: Acceso indirecto de banda ancha
Operador con PSM	Telefónica	Telefónica
Mercado geográfico	Nacional	Nacional
Fibra óptica hasta el hogar (FTTH)	No habrá obligaciones de acceso (no desagregación de la fibra óptica).	Obligaciones de acceso indirecto (oferta mayorista <i>bitstream</i>) hasta 30 Mbit/s. No obligación de oferta mayorista <i>bitstream</i> a partir de 30 Mbit/s Precios orientados a costes.
Red legada de cobre	Se mantienen las obligaciones de desagregación del bucle y del subbucle. (OBA) Obligaciones de acceso a los conductos y la infraestructura pasiva. (Apertura de canalizaciones) Precios orientados a costes.	Obligaciones de acceso indirecto hasta 30 Mbit/s. Precios orientados a costes.
Red híbrida de cobre y fibra (FTTx)	Se mantienen las obligaciones de desagregación del subbucle.	Obligaciones de acceso indirecto hasta 30 Mbit/s. Precios orientados a costes.
Obligaciones de transparencia	Publicar una oferta mayorista de referencia (Oferta de acceso al Bucle de Abonado, OBA) y actualizarla anualmente. Publicar una oferta mayorista de referencia de acceso a la infraestructura de obra civil. Informar con detalle y con 6 meses de antelación sobre los cambios en la arquitectura de la red (incluyendo los nodos remotos).	Publicar una nueva oferta mayorista de referencia de acceso indirecto regional (superando la división actual de servicio nacional y servicio regional). La nueva oferta será más flexible e independiente de los productos minoristas de Telefónica de modo que los operadores puedan escoger combinaciones de velocidades ascendentes y descendentes.
Cierre de centrales	Si hay operadores coubicados: un período mínimo de garantía de 5 años desde la comunicación del cierre de la central. Si no hay operadores coubicados: período de garantía de un año.	

Fuente: CMT

4.5 Resumen

La evolución de la competencia difiere de unas a otras áreas geográficas debido a los distintos enfoques de los procesos de liberalización emprendidos en cada una de ellas. Mientras que en Europa se abordó mediante una regulación evolutiva, no disruptiva, en Estados Unidos se inició una década antes, en los 80, imponiendo la ruptura de los monopolios por ley seguido, posteriormente, por diez años de litigios que finalizaron en el año 2006, cuando se aprobaron las reglas de desagregación propuestas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), que han llevado a un mercado muy competitivo. Por otra parte, en Asia, especialmente en Japón y Corea, países con mucho desarrollo de las tecnologías de telecomunicación y de su mercado, se da una alta participación pública.

En Europa los mercados han evolucionado hacia un aumento de la competencia a un ritmo relativamente lento, aunque creciente en los últimos años pero con altibajos. Por esto, la Unión Europea está dando un nuevo impulso al proceso liberalizador, cimentado en a) la regulación “ex-post”; b) el equilibrio entre la autonomía de cada organismo regulador nacional y las atribuciones de un nuevo organismo europeo de regulación, c) la separación funcional de los operadores incumbentes, si se requiriera para activar la competencia; y d) el desarrollo de las nuevas infraestructuras de acceso de fibra óptica. La transposición de esta nueva legislación, que deberá estar lista no más tarde del año 2010, implicará la adaptación de todos los países de la UE, España entre ellos.

La situación actual en España respecto a la competencia difiere según el subsegmento de mercado considerado. En conjunto, si se pondera el grado de competencia con los volúmenes de mercado correspondientes a cada subsegmento, el mercado cada vez es más competitivo (Figura 125). En concreto, el entorno con mayor competencia es el subsegmento de comunicaciones móviles. Por el contrario, el acceso fijo, especialmente en acceso de banda ancha, dista bastante del equilibrio en la competencia. En este ámbito el operador histórico ha llegado a aumentar su cuota de mercado, aunque se empieza a observar la reacción de sus competidores.

Por último, otro aspecto importante es el creciente grado de empaquetado de servicios observado tanto en España como en Europa, que están evolucionando hacia el *quadruple play*, mediante la incorporación de ofertas conjuntas de los servicios fijos de voz, acceso a Internet y audiovisual con servicios de voz y acceso móvil a Internet. Esto indica que cada vez será más necesario analizar la competencia en su conjunto para tener una visión real del mercado.

5 CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores se ha realizado un análisis individualizado de las tecnologías de redes de acceso de banda ancha, considerando sus prestaciones, madurez, grado de normalización, adecuación para prestar diversos servicios de telecomunicación y capacidad de evolución. Se puede concluir que tanto las tecnologías sobre cable como las inalámbricas han experimentado importantes mejoras de prestaciones en los últimos años, alcanzando valores de capacidad que permiten, en todos los casos, proporcionar servicios de acceso a Internet sin restricciones relevantes. En cuanto al servicio de distribución de TV, teniendo en cuenta las prestaciones técnicas, madurez y escalabilidad de las tecnologías, es factible ofrecerlo con HFC, xDSL, Fibra y Satélite. El acceso móvil de banda ancha se puede proporcionar de varios modos, pero las redes UMTS son las que están mejor posicionadas para suministrarlo de manera eficiente. Las redes WiMAX y las redes locales inalámbricas se consideran soluciones “de nicho”, puesto que pueden resolver por sí solas escenarios concretos, pero tienen limitaciones en cuanto a escalabilidad y soporte de servicios de telecomunicación.

Si se analiza la adecuación de cada tecnología para prestar el servicio *quadruple play* (telefonía, Internet, televisión y movilidad), el resultado es que no lo permite ninguna, por lo que se hace necesario emplear una combinación de redes de acceso. Este tipo de situaciones, caracterizado por la operación de múltiples infraestructuras de red, ha sido objeto de numerosos trabajos en telecomunicaciones y ha recibido tratamiento específico en el capítulo sobre convergencia de redes. Del análisis realizado se puede concluir que se han dado pasos importantes hacia el objetivo de “Red Única”. La tecnología IP con soporte de calidad de servicio y transporte óptico se ha convertido en un elemento muy extendido en las infraestructuras de telecomunicación, empleado en redes fijas y móviles, y para todo tipo de servicios.

La situación no es tan homogénea cuando se analiza la evolución de la inteligencia de red, habiéndose identificado dos modos de converger. Por un lado, se encuentra la línea necesariamente conservadora de los operadores de telecomunicación, que podrían adoptar la tecnología IMS (Subsistema IP Multimedia) para integrar todos los servicios en una sola red o explotar la planta instalada hasta el límite de sus posibilidades. Por otra parte, está la evolución a medio y largo plazo de Internet, que daría lugar a una nueva red cuyas bases se están actualmente definiendo en programas de investigación y desarrollo. Evidentemente, las dos tendencias son complementarias, tanto porque los avances de una se podrán incorporar en la otra, como porque los dos entornos, telecomunicaciones e Internet, tienen cada vez más en común.

Por último, se ha analizado el grado de competencia del mercado de servicios de telecomunicación y la incidencia que tienen la regulación y la acción pública en su desarrollo. Se ha prestado especial atención al mercado europeo y, dentro de él, al español, después de revisar las características más relevantes del mercado

estadounidense y de algunos países asiáticos. En Europa los mercados han evolucionado hacia un aumento de la competencia a un ritmo relativamente lento. Por este motivo, la Unión Europea está dando un nuevo impulso al proceso liberalizador a través del denominado “Paquete de Telecomunicaciones”, que deberá estar en vigor no más tarde del año 2010.

La situación actual en España es similar a la del resto de Europa, dándose el mayor grado de competencia en los servicios de comunicaciones móviles, mientras que en el acceso de banda ancha se mantiene el liderazgo claro del operador histórico. Conviene mencionar que se ha observado un grado creciente de empaquetamiento de servicios, que está evolucionando hacia el *quadruple play*, mediante la incorporación de ofertas conjuntas de los servicios fijos de voz, acceso a Internet y audiovisual con servicios de voz y acceso móvil a Internet.

GLOSARIO

3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
AAA	Authentication, Authorization and Accounting
ADM	Add Drop Multiplexer
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AGW	Access Gateway
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AM-VSB	Amplitude Modulation/Vestigial Side-Band
ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
APON	ATM Passive Optical Network
ASN	Access Service Network
ATC	Ancillary Terrestrial Component
A-TDMA	Advance frequency agile Time Division Multiple Access
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATO	Analog Turn-off
AuC	Authentication Center
BA	Banda Ancha
BE	Best Effort
B-PON	Broadband PON
BRAN	Broadband Radio Access Network
BRAS	Broadband Access Server
BSM	Broadband Satellite Multimedia
BSS	Broadcast Satellite Service
CAPWAP	Control And Provisioning of Wireless Access Points
CATV	Community Antenna TV
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones
CLEC	Competitive Local Exchange Carrier (compañías telefónicas alternativas)

CM	Cable Modem
CMT	Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones
CMTS	Cable Modem Termination System
CN	Core Network
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CNR	Carrier to Noise Ratio
CNT	Cable Network Termination
COFDM	Coded OFDM
CPC	Continuous Packet Connectivity
CQI	Channel Quality Indicator
CS	Circuit-Switched
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CSN	Connectivity Service Network
CWDM	Coarse WDM
DCF	Distributed Coordination Function
DCT	Discrete Cosine Transform
DES	Data Encryption Standard
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DPU	Direct Pick-Up
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTH	Direct To Home
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-RCS	DVB - Return Channel by Satellite
DVB-SH	DVB - Satellite Services for Handheld
DVD	Digital Versatile Disc
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EAP	Extensible Authentication Protocol
ECTA	European Competitive Telecommunications Association (Asociación Europea de Telecomunicaciones Competitivas)
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDCH	Enhanced Dedicated Channel

EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifiers
EFM	Ethernet in the First Mile
EIR	Equipment Identity Register
E-MTA	Embedded Multimedia Terminal Adapter
EPC	Evolved Packet Core
EPG	Electronic Program Guide
EPON	Ethernet Passive Optical Network
EPS	Evolved Packet System
ErtVR	Extended Real-Time Variable Rate
ES	Elementary Stream
ESCON	Enterprise System Connection
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones)
EUTRAN	Enhanced UTRAN
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
FICON	Fiber Connectivity
FM	Frequency Modulation
FMC	Fixed-Mobile Convergence
FMCA	Fixed-Mobile Convergence Alliance
FOM	Fiber Optic Modem
FR	Frame Relay
FSAN	Full Service Access Network
FSO	Free Space Optics
FSS	Fixed Satellite Service / Frequency Stacking System
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTEx	Fiber to the Exchange
FTTH	Fiber to the Home
FTTK	Fiber to the Kerb (bordillo de la acera), también denominada FTTC
FTTN	Fiber to the Node

FTTO	Fiber to the Office
FTTX	Fiber to the X
GAN	Generic Access Network
GEO	Geostationary Earth Orbit
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMPCS	Global Mobile Personal Communications by Satellite
GOP	Group of Pictures
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HAP	High Altitude Platform
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HCX	Head-end Channel Switch
HDSL	High-speed Digital Subscriber Line
HDT	Host Digital Terminal
HDTV	High Definition Television
HEO	High inclined Elliptical Orbit
HFC	Hybrid Fiber Coaxial
HFR	Hybrid Fiber Radio
HIPERLAN	High Performance Radio Local Area Network
HLR	Home Location Register
HNB	Home Node-B
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High Speed Downlink Shared Channel
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Multicast Protocol
ILEC	Incumbent Local Exchange Carrier (compañías telefónicas dominantes)
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol Version 6
IRD	Integrated Receiver Decoder

IRT	Integrated Receiver Transcoder
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
LLC	Logical Link Control
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LNB	Low Noise Block
LOS	Line of Sight
LTE	Long-Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MDU	Multiple Dwelling Unit
MEO	Medium Earth Orbit
MFN	Multi Frequency Network
MF-TDMA	Multiple Frequency-Time Division Multiple Access
MHP	Multimedia Home Platform
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MMR	Mobile Multi-hop Relay
MPEG	Moving Picture Experts Group
MPEG-MPTS	MPEG-Multiprogram Transport Stream
MSC	Mobile Switching Centre
MSO	Multimedia Services Operator
MSS	Mobile Satellite Service
NCC	Network Control Center
NGEO	Non Geostationary Earth Orbit
NGN	Next Generation Network
NLOS	Non Line of Sight
NOT	Nodo Óptico Terminal
NRM	Network Reference Model
nrtPS	Non-Real-Time Packet Service
NVoD	Near VoD
OBP	On Board Processing

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLT	Optical Line Termination
OMR	Operador Móvil de Red
OMV	Operador Móvil Virtual
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
P2P	Peer to Peer
PAL	Phase Alternation Line
PAN	Personal Area Network
PCF	Point Coordination Function
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PEP	Performance Enhancing Proxies
PES	Packetized Elementary Streams
PLC	Power Line Communications
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Old Telephone Service
PS	Packet Switched
PSI	Program Specific Information
PSM	Poder Significativo de Mercado
PSS	Packet-Switched Streaming Service
PTNTDT	Plan Técnico Nacional de Televisión Digital Terrenal
PYME	Pequeña Y Mediana Empresa
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RFoG	Radio Frequency on Glass
RLC	Run Length Code
RNC	Radio Network Controller
RPR	Resilient Packet Ring
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTB	Red Telefónica Básica
RTP	Real Time Protocol
rtPS	Real-Time Packet Service
SAE	System Architecture Evolution

SAR	Specific Energy Absorption Rate
SCC	Satellite Control Center
S-CDMA	Synchronous Code Division Multiple Access
SCTE	Society of Cable Telecommunications Engineers
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDI	Serial Digital Interface
SDR	Satellite Digital Radio
SFN	Single Frequency Network
SFU	Single Family Unit
SGSN	Serving GPRS Support Node
SHDSL	Symmetric High-speed Digital Subscriber Line
SIP	Session Initiation Protocol
SNG	Satellite News Gathering
SNI	Service Node Interface
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SONET	Synchronous Optical Network
SRP	Spatial Reuse Protocol
SS7	Sistema de Señalización N° 7
SS-TDMA	Satellite Switched-Time Division Multiple Access
STB	Set-Top Box
STM-1	Synchronous Transport Module 1
TAP	Terminal Access Point
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TDT	Televisión Digital Terrestre
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
TIA	Telecommunications Industry Association
TISPAN	Telecoms & Internet converged Services & Protocols for Advanced Networks
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
TRAC	Telefonía Rural de Acceso Celular
TS	Transport Stream
TTI	Time Transmission Interval
TV	Televisión

UGS	Unsolicited Grant Service
UGS-AD	Unsolicited Grant Service with Activity Detection
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	UIT - sector de Radiocomunicaciones
UIT-T	UIT - sector de normalización de las Telecomunicaciones
UMA	Unlicensed Mobile Access / Universal Mobile Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
USAT	Ultra Small Aperture Terminal
UTECA	Unión de Televisiones Comerciales Asociadas
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
UWB	Ultra Wide Band
VC	Video Conference
VCC	Voice Call Continuity
VCR	Video Cassette Recorder
VDSL	Very high-speed Digital Subscriber Line
VLAN	Virtual Local Area Network
VLR	Visitor Location Register
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WCDMA	Wideband CDMA
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WEP	Wired Equivalent Privacy
WiBro	Wireless Broadband
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WLL	Wireless Local Loop
WMM	Wi-Fi Multimedia
WPA	Wi-Fi Protected Access
WRC	World Radiocommunication Conference
xDSL	Digital Subscriber Line

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W.S. Ciciora, "Cable Television in the United States, An overview", CableLabs, 1995.
- [2] J.A. Chiddix, et al, "The Use of Fiber Optics in Cable Communications Networks", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 11 (1), enero 1993.
- [3] T. Brophy, R. Howald, C. Smith, "Bringing together Headend Consolidation and High-Speed Data Traffic in HFC Architecture design", Motorola Broadband Communications Sector.
- [4] Cable Television Laboratories, DOCSIS Specifications, <http://www.cablemodem.com/specifications/>
- [5] D. Oliver Segura, "Servicios interactivos en TV Digital: la plataforma multimedia del hogar", BIT, noviembre-diciembre 1999.
- [6] UIT-T Recomendación J.112, "Sistemas de transmisión para servicios interactivos de televisión por cable", marzo 1998.
- [7] ETSI ES 201 488, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications".
- [8] Consorcio CableLabs, <http://www.cablelabs.com/>
- [9] "Cable Modem Shipments Growing Strong", 25/01/2008, Light Reading's Cable Digital News, <http://www.lightreading.com>
- [10] "ONO lanza su nuevo servicio de Internet ultrarrápido con velocidades de 100 y 50 megas", 15/09/2008, <http://prensa.ono.es/prensaDetalle.aspx?Id=1142>
- [11] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT). <http://www.cmt.es>
- [12] World Broadband Statistics: Q1 2008, Point Topic Ltd. <http://point-topic.com/>
- [13] DSL Forum, "DSL Anywhere: A paper designed to provide options for Service Providers to extend the reach of DSL into previously un-served areas". <http://www.dslforum.org>
- [14] D.C. Kent, "xDSL and Copper Pair Bonding", Conf. Association of Communication Engineers Applications, Challenges and Emplacement of Broadband Services.
- [15] M. Schenk, "VDSL2 - Taking Broadband Access Evolution to the Next Level", ITU-T Workshop NGN and its Transport Networks, Kobe, abril 2006.
- [16] J. Maes, et al, "Maximizing Digital Subscriber Line Performance", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.
- [17] C. Storry, et al, "Aspects of Dynamic Spectrum Management Level 3", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.

- [18] M. Zivkovic, et al, "Performance of Digital Subscriber Line Spectrum Optimization Algorithms", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.
- [19] R. Nagarajan, S. Ooghe, "Next-Generation Access Network Architectures for Video, Voice, Interactive Gaming, and Other Emerging Applications: Challenges and Directions", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.
- [20] T.N.M. Van Caenegem, et al, "Maintaining Video Quality and Optimizing Video Delivery Over the Bandwidth Constrained DSL Last Mile Through Intelligent Packet Drop", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.
- [21] CMT, "Oferta de Acceso al Bucle de Abonado", mayo 2008. <http://www.cmt.es>
- [22] M.K. Weldon, et al, "Next-Generation Access Networks: A Preview", Bell Labs Technical Journal, vol. 13 (1), 2008.
- [23] T. Hills, "The Future of Fiber Access", noviembre 2008. <http://www.lightreading.com>
- [24] M. Carrol, "Verizon FiOS FTTP Deployment and NG PON Perspectives", Joint ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems, junio 2008.
- [25] Y. Fujimoto, "NTT's FTTH deployment status and perspective toward next generation", Joint ITU-T/IEEE Workshop on Next Generation Optical Access Systems, junio 2008.
- [26] Motorola, "WDM/CWDM/DWDM: Segmentation Primer-Maximizing capacity for revenue", 2008.
- [27] Fiber to the Home Council. <http://www.ftthcouncil.org> (EE.UU.), <http://www.ftthcouncil.eu> (Europa), <http://www.ftthcouncilap.org> (Asia Pacífico).
- [28] IEEE 802.16-2001, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", 2001.
- [29] WiMAX Forum. <http://www.wimaxforum.org>
- [30] IEEE 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", octubre 2004.
- [31] IEEE 802.16e-2005, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", diciembre 2005.
- [32] IEEE 802.16j (Draft), "Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Multihop Relay Specification", Doc. 802.16j-06/026r4, junio 2006.
- [33] WiMAX Forum, "Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation", 2006.

- [34] WiMAX Forum, "WiMAX End-to-End Network Systems Architecture - Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points", enero 2008.
- [35] Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF).
<http://www.mityc.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx>
- [36] Orden ITC/3391/2007, de 15 de noviembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. Anexo.
http://www.boe.es/boe/dias/2007/11/23/pdfs/SUP07_281C.pdf
- [37] Recomendación 1999/519/EC, "Limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)", Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 12 de julio de 1999.
http://ec.europa.eu/enterprise/electr_equipment/lv/rec519.pdf
- [38] Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
<http://www.boe.es/boe/dias/2001/09/29/pdfs/A36217-36227.pdf>
- [39] Real Decreto 424/2005, de 15 de abril, por el que se aprueba el reglamento sobre las condiciones para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas, el servicio universal y la protección de los usuarios.
<http://www.boe.es/boe/dias/2005/04/29/pdfs/A14545-14588.pdf>
- [40] Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.
<http://www.boe.es/boe/dias/2002/01/12/pdfs/A01528-01536.pdf>
- [41] UIT-R Recomendación P.837-5, "Características de la precipitación para establecer modelos de propagación", agosto 2007.
- [42] J. Berrocal, E. Vázquez, F. González, M. Álvarez-Campana, J. Vinyes, G. Madinabeitia, V. García, "Redes de Acceso de Banda Ancha. Arquitectura, Prestaciones, Servicios y Evolución", Ministerio de Ciencia y Tecnología, (ISBN 84-7474-996-4), 2003.
- [43] A.C. Clarke, "El mundo es uno: del telégrafo a los satélites", Ediciones B, 1996.
- [44] T. Iida, J.N. Pelton, E. Ashford, P. Zarchan (Ed.), "Satellite Communications in the 21th Century: Trend and Technologies", Progress in Astronautics and Aeronautics Series, vol. 2003.
- [45] ESA Web Based Training System, Telecom program.
<http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=11503>
- [46] Telefónica I+D, "Las telecomunicaciones de Nueva Generación", Dirección General de Relaciones Institucionales, Telefónica, 2003.
- [47] WRC.8 (2007) Final Acts - WRC-07, Ginebra.

- [48] A. Vaneli-Coralli, G.E. Corazza, G.K. Karagiannidis, P.T. Mathiopoulos, D.S. Michalopoulos, C. Mosquera, S. Papaharalabos, S. Scalise, "Satellite Communications: Research Trends and Open Issues", International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC '07, 13-14 septiembre 2007.
- [49] S. Scalise, G.E. Corazza, C. Parraga Niebla, P. Chan, G. Giambene, F. Hu, A. Vaneli-Coralli, M.A. Vázquez-Castro, "Towards the revision of DVB-S2/RCS standard for the full support of mobility", IEEE COMSOC, SSC Newsletter, vol. 16 (2), noviembre 2006.
- [50] Frost & Sullivan's, "LEO Satellite Telephone Quality of Service Comparison - Gulf Coast Analysis", febrero 2008.
- [51] ETSI TS 102 585, "Digital Video Broadcasting (DVB), System Specifications for Satellite services to Handheld devices (SH) below 3 GHz", abril 2008.
- [52] J. Matos Gómez, "DVB-SH: la nueva generación de los sistema móviles por satélite", BIT, junio-julio 2008.
- [53] M. Wittig, "Satellite On Board Processing for Multimedia Applications", IEEE Communications Magazine, vol. 38 (6), junio 2000.
- [54] Número especial "High Altitude Platform (HAP) Systems: Technologies and Applications", Wireless Personal Communications, vol. 32, febrero 2005.
- [55] A. Mohammed, S. Arnon, D. Grace, M. Mondin, R. Miura, "Advanced Communication Techniques and Applications for High-Altitude Platforms", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2008.
- [56] A. Fidler, et al, "Satellite: A New Opportunity for Broadband Applications", BT Technology Journal, vol. 20 (1), enero 2002.
- [57] ETSI EN 302 307, "Digital Video Broadcasting (DVB), Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications", abril 2009.
- [58] DVB Fact Sheet DVB-S2 "2nd Generation Satellite", abril 2008.
- [59] ETSI EN 301 790, "Digital Video Broadcasting (DVB), Interaction channel for satellite distribution systems", enero 2009.
- [60] DVB Fact Sheet DVB-RCS, "Return Channel Satellite", abril 2008.
- [61] Digital Video Broadcasting Project (DVB). <http://www.dvb.org>
- [62] ETSI, Satellite Services – Standards.
<http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/Satellite.aspx>
- [63] H. Linder, et al, "Satellite Internet Services using DVB/MPEG-2 and Multicast Web Caching", IEEE Communications Magazine, vol. 38 (6), junio 2000.
- [64] D. E. Weinreich, ITU-T Workshop "Satellites in NGN?". ITU-R Working Party 4B. Montreal, julio 2007.

- [65] M.C. Comparini, A. Faure, R. Novello, J. Prat, "Telecommunications services by satellite: enabling technologies and examples", Alcatel Telecommunications Review - 5, 2º trimestre 2006.
- [66] Hispasat, Fichas técnicas de Flota de Satélites. <http://www.hispasat.com/>
- [67] Hughes, "Performance, Power, Unique Capabilities: SPACEWAY™ 3".
- [68] Euroconsult, "World Satellite Communications & Broadcasting Markets Survey, Market Forecasts to 2017", edición 2008.
- [69] Hispasat, Informe anual 2007.
- [70] O3b Networks. <http://www.o3bnetworks.com>
- [71] Decision nº 626/2008/EC of the European Parliament and of the Council of 30 June 2008 on the selection and authorisation of systems providing mobile satellite services (MSS). Official Journal of the European Union, L 172/15.
- [72] D. Adami, et al, "TCP-IP based Multimedia Applications and Services over Satellite Links", IEEE Personal Communications, vol. 8 (3), junio 2001.
- [73] I. Akyildiz, et al, "Research Issues for Transport Protocols in Satellite IP Networks", IEEE Personal Communications, vol. 8 (3), junio 2001.
- [74] Enter-IDATE, "DigiWorld Yearbook 2008 España. Los retos del mundo digital", junio 2008.
- [75] "Reforming the current telecom rules".
http://ec.europa.eu/information_society/policy/ecomm/tomorrow/index_en.htm
- [76] Comisión Europea, portal de la Sociedad de la Información en Europa.
http://ec.europa.eu/information_society/index_es.htm
- [77] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. <http://www.mityc.es>
- [78] European Space Agency (ESA), Telecommunications, Small GEO Programme.
<http://telecom.esa.int/telecom/www/area/index.cfm?fareaid=55>
- [79] JAXA, Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite KIZUNA (WINDS). http://www.jaxa.jp/projects/sat/winds/index_e.html
- [80] D.F. Bantz, F.J. Bauchot, "Wireless LAN Design Alternatives", IEEE Network, vol. 8 (2), abril 1994.
- [81] K.C. Chen, "Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing", IEEE Network, vol. 8 (5), septiembre 1994.
- [82] R.O. LaMaire, "Wireless LANs and Mobile Networking: Standards and Future Directions", IEEE Communications Magazine, vol. 34 (8), agosto 1996.
- [83] R. van Nee, et al, "New High-Rate Wireless LAN Standards", IEEE Communications Magazine, vol. 37 (12), diciembre 1999.

- [84] IEEE 802.11-2007, "IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", junio 2007.
- [85] Alianza Wi-Fi. <http://www.wi-fi.org>
- [86] T. Sridhar, "Wireless LAN Switches - Functions and Deployment", The Internet Protocol Journal, vol. 9 (3), septiembre 2006.
- [87] B.P. Crow, et al, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 35 (9), septiembre 1997.
- [88] ETSI TR 101 683, "Broadband Radio Access Networks (BRAN), HIPERLAN Type 2, System Overview", febrero 2000.
- [89] ETSI BRAN (Broadband Radio Access Networks). <http://www.etsi.org/bran>
- [90] A. Doufexi, et al, "A Comparison of the HiperLAN2 and IEEE 802.11a Wireless LAN Standards", IEEE Communications Magazine, vol. 40 (5), mayo 2002.
- [91] J. Khun-Jush, et al, "HIPERLAN2: Broadband Wireless Communications at 5 GHz", IEEE Communications Magazine, vol. 40 (6), junio 2002.
- [92] S. Fluhrer, I. Mantin, A. Shamir, "Weaknesses in the Key Scheduling Algorithm of RC4", Lecture Notes in Computer Science, vol. 2259, 8th Annual Workshop on Selected Areas in Cryptography, Toronto, Ontario, Canadá, agosto 2001.
- [93] A. Stubblefield, J. Ioannidis, A.D. Rubin. "Using the Fluhrer, Mantin, and Shamir Attack to Break WEP", AT&T Labs Technical Report TD-4ZCPZZ, agosto 2001.
- [94] G. Goth, "Read it and WEP", IEEE Internet Computing, vol. 6 (1), enero-febrero 2002.
- [95] B. Potter, "Wireless security's future", IEEE Security & Privacy, vol. 1 (4), julio-agosto 2003.
- [96] J.-C. Chen, Y.-P. Wang, "Extensible Authentication Protocol (EAP) and 802.1x: Tutorial and Empirical Experience", IEEE Radio Communications, diciembre 2005.
- [97] S. Wong, "The evolution of wireless security in 802.11 networks: WEP, WPA and 802.11 standards", SANS Institute, mayo 2003.
- [98] D. Gu, J. Zhang, "QoS Enhancements in IEEE 802.11 WLANs", IEEE Communications Magazine, vol. 41 (6), junio 2003.
- [99] Alianza Wi-Fi, "Support for Multimedia Applications with QoS in Wi-Fi", septiembre 2004.
- [100] Y. Xiao, "IEEE 802.11e: QoS provisioning at the MAC Layer", IEEE Wireless Communications, vol. 11 (3), junio 2004.

- [101] S. Bangolae, C. Bell, E. Qi, "Performance Study of Fast BSS Transition using IEEE 802.11r", Proceedings of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing, Vancouver, British Columbia, Canadá, 2006.
- [102] Y. Xiao, "IEEE 802.11n: Enhancements for Higher Throughput in Wireless LANs", IEEE Wireless Communications, vol. 12 (6), diciembre 2005.
- [103] E. Perahia, "IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology", IEEE Communications Magazine, vol. 46 (7), julio 2008.
- [104] J.D. Camp, E.W. Knightly, "The IEEE 802.11s Extended Service Set Mesh Networking Standard", IEEE Communications Magazine, vol. 46 (8), agosto 2008.
- [105] E. Fernández, "Wi-Fi: nuevos estándares en evolución", Centro de Difusión de Tecnologías ETSIT-UPM (CEDITEC), enero 2007.
- [106] IEEE, "Official IEEE 802.11 working group project timelines".
http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm
- [107] IEEE, "Autorizaciones de proyecto (PAR)".
<http://www.ieee802.org/11/PARs/index.html>
- [108] 3GPP TS 23.234, "3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking, System Description", octubre 2006.
- [109] 3GPP TS 43.318, "Generic Access Network (GAN), Stage 2", diciembre 2008.
- [110] 3GPP TS 23.206, "Voice Call Continuity (VCC) between Circuit Switched (CS) and IP Multimedia Subsystem (IMS), Stage 2", marzo 2007.
- [111] G. Lampropoulos, A.K. Salkintzis, N. Passas, "Media-Independent Handover for Seamless Service Provision in Heterogeneous Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 46 (1), enero 2008.
- [112] Alianza Wi-Fi, "Wi-Fi Protected Setup: Easing the User Experience for Home and Small Office Wi-Fi Networks", febrero 2008.
- [113] Alianza Wi-Fi, "Wi-Fi Certified Voice-Personal", junio 2008.
- [114] IETF RFC 4565, "Evaluation of Candidate Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP) Protocols", D. Loher, D. Nelson, O. Volinsky, B. Sarikaya, julio 2006.
- [115] EDUcation ROAMing (eduroam). <http://www.eduroam.org>
- [116] FON. <http://www.fon.com>
- [117] F. Panken, et al, "Extending 3G/WiMAX Networks and Services through Residential Access Capacity", IEEE Communications Magazine, vol. 45 (12), diciembre 2007.

- [118] Servicio "Único" de Orange.
http://movil.orange.es/servicios/servicio_unico/
- [119] J. Wexler, "WLAN Deployment Trends", octubre 2008.
<http://www.webtutorials.com>
- [120] R. Layland, "Understanding Wi-Fi Performance", Business Communication Review, marzo 2004.
- [121] X. Ling, Y. Cheng, X. Shen, J.W. Mark, "Voice Capacity Analysis of WLANs with Channel Access Prioritizing Mechanisms", IEEE Communications Magazine, vol. 46 (1), enero 2008.
- [122] J. Wexler, "WLAN State-of-the-Market Report", octubre 2007.
<http://www.webtutorials.com>
- [123] G. Venkatesan, A. Ashley, E. Reuss, T. Cooklev, "Video over 802.11", IEEE 802 tutorial, marzo 2007. http://www.ieee802.org/802_tutorials/index.html
- [124] P. Robinson, D. Yedwab, "Voice over WLAN: The Current State", Business Communication Review, Kubernan, julio 2007.
- [125] K. Chebrolu, B. Raman, S. Sen, "Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience", ACM MobiCom 2006, Los Angeles, California, septiembre 2006.
- [126] V. Macdonald, "The Cellular Concept", Bell Systems Technical Journal 58, enero 1979.
- [127] S.M. Redl, M.K. Weber, M.W. Oliphant, "An Introduction to GSM", Artech House, 1995.
- [128] C. Bettstetter, et al, "GSM Phase 2+ General Packet Radio Service: Architecture, Protocols, and Air Interface", IEEE Communication Surveys, 3^{er} trimestre 1999 (<http://www.comsoc.org/pubs/surveys>).
- [129] H. Kaaranen (Ed.), "UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services", John Wiley & Sons, 2001.
- [130] V. Garg, "IS-95 CDMA and CDMA 2000: Cellular/PCs Systems Implementation", Prentice Hall, 1999.
- [131] UMTS Forum, "HSPA: High Speed Wireless Broadband, From HSDPA to HSUPA and Beyond", junio 2005.
- [132] H. Holma, A. Toskala (Ed.), "WCDMA for UMTS - Radio Access for Third Generation Communications", John Wiley & Sons, 2000.
- [133] D.E. McDysan, D.L. Spohn, "ATM Theory and Applications", McGraw-Hill, 1999.
- [134] Especificaciones de UMTS, servidor Web del 3GPP (Third Generation Partnership Project), <http://www.3gpp.org>

- [135] 3GPP TS 25.308, "High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), Overall description, Stage 2", diciembre 2004.
- [136] 3GPP TS 25.309, "FDD Enhanced uplink, Overall description, Stage 2", abril 2006.
- [137] 3GPP TS 23.205, "Bearer-Independent Circuit-Switched Core Network - Stage 2", octubre 2006.
- [138] 3GPP TR 25.933, "IP Transport in UTRAN Work Task Technical Report", marzo 2002.
- [139] 3GPP TS 23.228, "IP Multimedia Subsystem (IMS), Stage 2", junio 2006.
- [140] IETF RFC 3550, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", H. Schulzrinne, et al, julio 2003.
- [141] IETF RFC 3261, "SIP: Session Initiation Protocol", J. Rosenberg, et al, junio 2002.
- [142] 3G Americas, "EDGE, HSPA, and LTE Broadband Innovation", septiembre 2008.
- [143] UMTS Forum, "300 million UMTS subscribers: mobile broadband goes global", octubre 2008. <http://www.ums-forum.org/>
- [144] UMTS Forum, "Annual Report 2008 and directions for 2009", enero 2009. <http://www.ums-forum.org/>
- [145] CMT, "Estadísticas del Sector. III Trimestre 2008". <http://www.cmt.es>
- [146] ERC/DEC/(99)25, "ERC Decision on the harmonised utilisation of spectrum for terrestrial UMTS operating within the bands 1900 - 1980 MHz, 2100 - 2250 MHz and 2110 - 2170 MHz", noviembre 1999.
- [147] S.G. Steinberg, "Netheads vs Bellheads", Wired, octubre 1996.
- [148] UIT-T Recomendación Y.2001, "Visión general de las redes de próxima generación", diciembre 2004.
- [149] IETF RFC 3588, "Diameter Base Protocol", P. Calhoun, et al, septiembre 2003.
- [150] D. Papadimitriou, et al, "Future Internet, The Cross-ETP Vision Document", enero 2009.
- [151] D. Kennedy, Future Internet - a Networked & Electronic Media (NEM) R&D Cluster.
- [152] FIRE Scientific and Industrial Preparatory Expert Groups, "The European FIRE- Future Internet Research and Experimentation Activities", junio 2007.
- [153] P. Mähönen, D. Trossen, D. Papadimitriou, G. Polyzos, D. Kennedy, "A white paper from the EIFFEL Think-Tank", diciembre 2006.
- [154] CMT, "Informe Anual 2007", julio 2008. <http://www.cmt.es>

- [155] F. Vanier, "World Broadband Statistics: Q2 2008". Point Topic, septiembre 2008.
- [156] "Broadband Subscriber Total Tops 400 Million".
<http://www.telecomweb.com/news/broadband/charts/262012.html>
- [157] ETNO, "Facts & Figures about European Telecoms Operators", 3ª edición, septiembre 2008.
- [158] IDATE-Enter, "DigiWorld Yearbook 2008 España. Los retos del mundo digital", junio 2008.
- [159] COVAD Order. http://www.fcc.gov/wcb/cpd/triennial_review/
- [160] R.L. Katz, "La Competencia entre plataformas: teoría y resultados", ENTER, diciembre 2008. <http://www.enter.es>
- [161] Ofcom, "The International Communications Market 2008", noviembre 2008.
- [162] V. Reding, EU Telecoms Commissioner, "Europe's Telecoms Incumbents: Friends or Foes of a Single Telecoms Market?", CEO Summit of the European Telecommunications Networks' Operators Associations, SPEECH/08/561. Venecia, octubre 2008.
- [163] ECTA, "Broadband Scorecard", marzo 2009.
- [164] COM (2007) 697 final. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifican la Directiva 2002/21/CE relativa a un marco regulador común de las redes y los servicios de comunicaciones electrónicas, la Directiva 2002/19/CE relativa al acceso a las redes de comunicaciones electrónicas y recursos asociados, y a su interconexión, y la Directiva 2002/20/CE relativa a la autorización de redes y servicios de comunicaciones electrónicas. <http://eur-lex.europa.eu/es/index.htm>
- [165] COM (2007) 698 final. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifican la Directiva 2002/22/CE relativa al servicio universal y los derechos de los usuarios en relación con las redes y los servicios de comunicaciones electrónicas, la Directiva 2002/58/CE relativa al tratamiento de los datos personales y a la protección de la intimidad en el sector de las comunicaciones electrónicas y el Reglamento (CE) nº 2006/2004 sobre la cooperación en materia de protección de los consumidores. <http://eur-lex.europa.eu/es/index.htm>
- [166] COM(2007) 699 final. Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se crea la Autoridad Europea del Mercado de las Comunicaciones Electrónicas. <http://eur-lex.europa.eu/es/index.htm>
- [167] "Reforma de las telecomunicaciones: la Comisión presenta nuevos textos legislativos para allanar el camino hacia una transacción entre el Parlamento y el Consejo", IP/08/1661, Bruselas, noviembre 2008.
- [168] CMT, "Nota Mensual - Diciembre 2008". <http://www.cmt.es>

- [169] European Commision Information Society and Media, "Broadband Performance Index", septiembre 2008.
- [170] CMT, "Estadísticas del Sector. IV Trimestre 2008", abril 2009.
<http://www.cmt.es>
- [171] CMT, "Resolución por la que se aprueba la definición y el análisis del mercado de acceso (físico) al por mayor a infraestructura de red (incluido el acceso compartido o completamente desagregado) en una ubicación fija y el mercado de acceso de banda ancha al por mayor, la designación de operador con poder significativo de mercado y la imposición de obligaciones específicas, y se acuerda su notificación a la comisión europea", Expediente número MTZ 2008/626, 22 enero 2009.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

SUBSECRETARÍA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

DIVISIÓN DE INFORMACIÓN,
DOCUMENTACIÓN Y PUBLICACIONES

CENTRO DE PUBLICACIONES

Paseo de la Castellana, 160. 28071 Madrid
Tels. 91. 349 51 29 / 4968 / 4000
Fax: 91. 349 44 85
www.mityc.es

ISBN 978-84-96379-95-9



R 7566m 775Rm7 >